



Universidad  
Complutense  
Madrid



Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Evolución erosiva y geomorfológica de restauraciones mineras en la mina Fortuna (Ademuz, Valencia)

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

**Presentado por:**

D<sup>a</sup> Andrea García García

**Directores:**

Dr. José Manuel Nicolau Ibarra y Dr. Ignacio Zapico Alonso

**Tutor académico:**

Dr. José Francisco Martín Duque

En Madrid a 26 de Enero de 2021

## ÍNDICE

Resumen .....	3
Abstract .....	4
1. Introducción .....	5
2. Objetivos .....	7
3. Descripción del área de trabajo .....	8
3.1. Clima .....	11
3.2. Referente geomorfológico .....	12
3.3. Restauración de la mina Fortuna .....	13
4. Material y métodos .....	18
4.1. Cartografía y cuantificación de las formas erosivas, cauces restaurados y cubierta vegetal .....	19
4.2. Estimación del efecto erosivo provocado por los factores implicados en el ecosistema .....	20
4.3. Determinación de la tasa de erosión anual .....	22
5. Resultados .....	23
5.1. Cuantificación de los regueros .....	23
5.3. Efecto erosivo de los factores del ecosistema .....	39
5.4. Tasas de erosión anual .....	47
6. Discusión .....	48
6.1. Formas erosivas, caudales restaurados y cobertura vegetal .....	48
6.2. Efecto erosivo de los diferentes factores .....	51
6.3. Estimación de la tasa de erosión anual .....	53
7. Conclusión .....	54
8. Agradecimientos .....	55
9. Bibliografía .....	56
10. Anexos .....	59

## Resumen

La minería es una actividad esencial en nuestra sociedad, pero genera importantes impactos ambientales que reducen los servicios ecosistémicos. La restauración es una herramienta básica para la sostenibilidad minera, pero no suele funcionar adecuadamente por la inestabilidad geomorfológica que genera. Actualmente, la restauración geomorfológica se está generalizando para favorecer la estabilidad de estos ecosistemas. Existen varias metodologías que desarrollan esta disciplina, siendo el método GeoFluv™ el más usado en minería.

Una de las últimas explotaciones mineras restauradas con esta técnica es la mina Fortuna (Ademuz, Valencia). El proyecto comenzó en 2017 con un remodelado topográfico mediante el método GeoFluv™, separando la mina en dos secciones; Z-Grande y Z-Pequeña. Posteriormente, se extendió sobre estas zonas un sustrato mayoritariamente tipo coluvión, cubriéndolas con lodos de depuradoras compostados y finalmente revegetándolas.

En este TFM se realiza el seguimiento geomorfológico de la mina, evaluando las formas de erosión en la restauración entre los años 2019 y 2020. Para ello, se ha cartografiado el conjunto de regueros generados; se estudia el perfil de los caudales restaurados GeoFluv™ y su evolución a lo largo de estos años. Además, se ha analizado la cobertura vegetal y el efecto del tipo de suelo, la topografía y la pendiente sobre la formación de regueros. Por último, se estima la tasa de erosión anual de la explotación.

Como resultado, se han contabilizado 787 regueros en total, con una densidad de 0,056 m/m<sup>2</sup>. Además, se ha observado erosión remontante en la mayoría de los canales restaurados. Se destaca la creación de regueros en zonas donde no se ha favorecido la vegetación, con sustratos no adecuados, en vaguadas, perfiles rectilíneo-cóncavos y con una pendiente entre los 20°- 45°. Por último, se han obtenido tasas de erosión muy elevadas si se comparan con las tasas máximas de erosión en ambientes mediterráneos.

*Palabras clave:* restauración geomorfológica, restauración de minas, GeoFluv, erosión hídrica, formas erosivas.

## Abstract

Mining is an essential activity in our society, but it generates significant environmental impacts that reduce ecosystem services. Restoration is a basic tool for mining sustainability, but it does not usually work properly due to the geomorphological instability it generates. Currently, geomorphic reclamation is becoming generalized to favor the stability of these ecosystems. There are several methodologies that develop this discipline, being the GeoFluv™ method the most used in mining.

One of the last mining operations restored with this technique is the Fortuna mine (Ademuz, Valencia). The project began in 2017 with a topographic remodeling using the GeoFluv™ method, separating the mine into two sections; Z-Grande and Z-Pequeña. Subsequently, a mostly colluvium-type substrate was spread over these areas, covering them with composted sewage sludge and finally revegetating them.

In this TFM the geomorphic monitoring of the mine is carried out, evaluating the forms of erosion in the restoration between the years 2019 and 2020. For this, the set of streams generated has been mapped; the profile of the channels GeoFluv™ flows and their evolution over these years are studied. In addition, the vegetation cover and the effect of the type of soil, the topography and the slope on the formation of rills have been analyzed. Finally, the annual erosion rate of the exploitation is estimated.

As a result, a total of 787 rills have been counted, with a density of 0,056 m/m<sup>2</sup>. In addition, remnant erosion has been observed in most of the restored canals. The creation of furrows in areas where vegetation has not been favored, with unsuitable substrates, in stream beds, rectilinear-concave profiles and with a slope between 20°-45 ° stand out. Finally, very high erosion rates have been obtained when compared to the maximum erosion rates in Mediterranean environments.

**Keywords:** geomorphic reclamation, mine restoration, GeoFluv, water erosion, erosive forms



## **Evolución erosiva y geomorfológica de restauraciones mineras en la mina Fortuna (Ademuz, Valencia)**

### **1. Introducción**

La minería es una actividad esencial en las sociedades contemporáneas (Martín-Moreno et al., 2016; Rohrer, Z., 2015). Desde la Prehistoria, el ser humano se ha beneficiado de esta labor para la obtención de materiales fundamentales que permitan el avance tecnológico de la sociedad (Rohrer, Z., 2015). Aun así, este tipo de industria genera grandes modificaciones ambientales, provocando, en algunos casos, la alteración severa de la funcionalidad de los ecosistemas (Martín-Moreno et al., 2018). Este suceso suele estar vinculado a la minería a cielo abierto, que produce daños significativos en el medio, tanto dentro (*on site effects*) como fuera del territorio ocupado (*off site effects*). Un ejemplo de ello es la degradación de los sistemas fluviales que modifica la composición del agua, generando una contaminación de los ríos y una perturbación en todo el ecosistema (Zapico et al., 2018; Martín-Moreno et al., 2016). Por otro lado, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el crecimiento de la población mundial aumentará en grandes proporciones para el 2100. Este hecho incrementará la demanda de recursos minerales, por lo que se precisará de gestiones adecuadas y soluciones sostenibles para reducir los impactos creados por la minería (Bugosh y Epp, 2019).

En la actualidad, todas las actividades mineras tienen que contar con un proyecto de restauración para evitar daños ambientales una vez los trabajos hayan cesado (Zapico et al., 2018). Pero, en numerosas ocasiones, dichos planes contienen fallos y el resultado no es el deseado (Martín-Moreno et al., 2016). Los problemas más comunes derivan de la inestabilidad del terreno o la falta de equilibrio entre las funciones básicas del ecosistema (Nicolau, 2002). En general, las restauraciones mineras se realizan a partir de técnicas convencionales que promueven la creación de formas de relieve poco estables, como las terrazas o laderas rectilíneas (Bugosh y Epp, 2019; Zapico et al., 2018). Éstas son proclives a desarrollar procesos erosivos en el terreno pues no disponen de una red de drenaje adecuada, lo que acentúa la erosión hídrica sobre el ecosistema, y, por tanto, una alteración de la edafogénesis y de los procesos ecológicos que favorecen el establecimiento y desarrollo de la vegetación (Nicolau et al. 2011; Espigares et al., 2009). A estos inconvenientes se suma el hecho de que las restauraciones mineras a cielo abierto son especialmente sensibles a la degradación y

aceleración de la erosión del suelo en los primeros años (Moreno de las Heras et al., 2009).

Esta erosión es responsable de la pérdida de nutrientes, propágulos y sustratos biológicos que se encuentran en el suelo. Generalmente, esto se traduce en la formación de redes de regueros y cárcavas, que disminuyen la infiltración del agua en las laderas y retrasan la sucesión ecológica en la zona (Zapico et al., 2018; Merino-Martín et al., 2012; Espigares et al., 2009; Nicolau, 2002). La creación de estas formas erosivas se debe a diferentes condicionantes ambientales (Cermeno, 2017; González-Hidalgo et al., 2012; Hancock et al., 2008), por lo que las restauraciones mineras deberían abordarse incluyendo todos los aspectos implicados en el ecosistema (Zapico et al., 2019).

Para llevar a cabo restauraciones mineras estables frente a la erosión, en los últimos años, se está aplicando la restauración geomorfológica (Zapico et al., 2019). Martín-Duque et al., en 2015, definen la geomorfología como *“el estudio interdisciplinario y sistemático de los accidentes geográficos y sus paisajes, así como los procesos de la superficie terrestre que crean y cambian”*. Comprender su influencia en un sistema minero es esencial para que la restauración tenga éxito, ya que dentro de la geomorfología se incluye el suelo, la hidrología y los procesos erosivos, compartiendo una estrecha relación con el paisaje y la vegetación (Zapico et al., 2018; Hancock y Willgoose, 2016). El objetivo de las restauraciones geomorfológicas debe ser la reconstrucción de un paisaje estable, mediante la creación de cuencas de drenaje que funcionen nuevamente como sistemas abiertos de flujos de agua y sedimentos que generen bajas tasas de erosión (Bugosh y Epp, 2019). De esta forma, la degradación ambiental disminuye, tanto dentro como fuera del territorio, y se fomenta la construcción de un ecosistema sostenible, donde la fauna y flora puedan colonizar la zona de modo espontáneo (Nicolau et al. 2011; Toy y Chuste, 2005). En general, es altamente recomendable, hacer actuaciones de suelo y revegetación sobre los acabados geomorfológicos una vez construidos.

Gracias a los avances tecnológicos, la restauración geomorfológica se puede llevar a cabo más allá de la teoría. El procedimiento más reconocido es el desarrollado por Nicholas Bugosh en Estados Unidos, llamado GeoFluv™ (Bugosh, 2000). Se trata de un método geomorfológico fluvial que diseña formas naturales atendiendo al clima y territorio específico donde se va a ejecutar la restauración (Bugosh y Epp, 2019). Esta

técnica utiliza diferentes ecuaciones que reproducen los procesos naturales y que varían según distintos parámetros tales como la pendiente, la precipitación o el coeficiente de escorrentía. El resultado final es el diseño de un paisaje con una red de drenaje y laderas similares a la que se desarrollarían localmente bajo la acción de procesos naturales (Zapico et al., 2018). Es importante que, a la hora de llevar a cabo estos diseños, se identifique un ecosistema de referencia, del que se obtienen los parámetros utilizados por el *software Natural Regrade* que desarrolla el método GeoFluv™, el utiliza el entorno CAD. Se suele complementar con *software* que muestren la evolución del paisaje creado a corto y largo plazo, como *SIBERIA* (Zapico et al., 2019).

Una de las últimas explotaciones mineras restauradas mediante el método GeoFluv™ es la mina Fortuna, localizada en Ademuz (Valencia). Fue intervenida en 2017 gracias al *Proyecto LIFE TECMINE - Innovative techniques for Facies Weald and Utrillas mine Restoration (LIFE16 ENV/ES/000159)*.

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar la evolución de las formas de erosión en la restauración de la mina Fortuna en sus dos primeros años (2019 y 2020).

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Cartografiar y cuantificar la formación de regueros.
- Cartografiar y cuantificar los canales restaurados y regueros de mayor tamaño.
- Cartografiar y cuantificar la cobertura vegetal.
- Estimar el efecto de las lomas y vaguadas sobre la generación de formas erosivas.
- Estimar el efecto del tipo de suelo (coluvión y estéril) sobre la generación de formas erosivas.
- Estimar el efecto de la pendiente sobre la generación de formas erosivas.
- Estimar el efecto de la evolución de los perfiles longitudinales de las laderas.
- Realizar una estimación de la tasa de erosión anual.

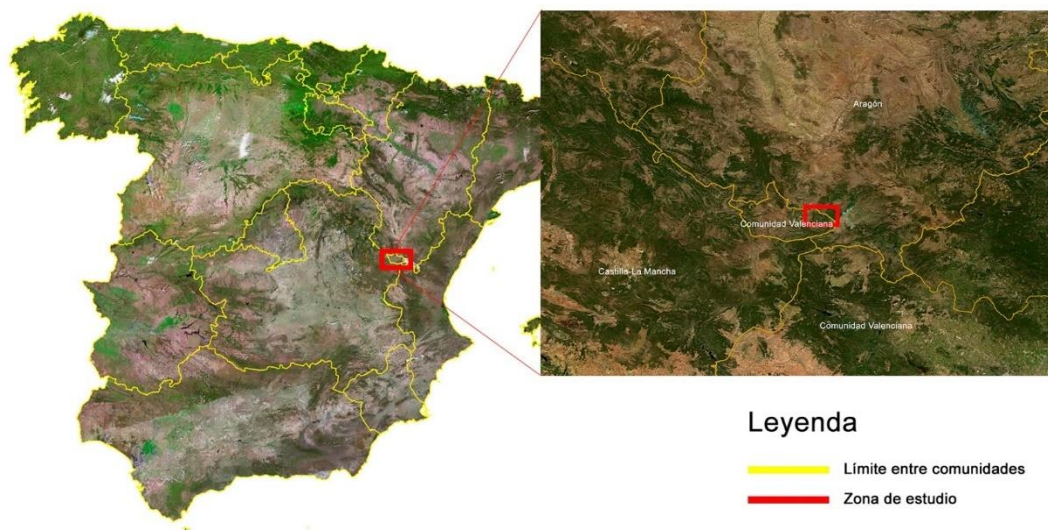
### 3. Descripción del área de trabajo

La mina Fortuna se localiza en el municipio de Ademuz (Valencia, España), en las coordenadas 40°03'48"N, 1°17'10"O, con una altitud aproximada de 1.000 m.s.n.m. Se encuentra situada entre el límite de la Comunidad Valenciana y Aragón, a 1,40 km de la villa de Riodeva (Teruel). La explotación se ve atravesada por el río Riodeva y se sitúa en una ladera de umbría ocupada por bosques de *Quercus ilex* (comprendidos por antiguos bancales de cultivo abandonados en proceso de matorralización y con escombreras y huecos mineros de otras explotaciones). La carretera más cercana es la TE-V-6012, que conecta la nacional N-330 con el pueblo (Figura 1).

La zona de estudio se encuentra dentro del Sistema Ibérico, formando parte de las Facies de Utrillas y Weald. La topografía circundante se caracteriza por mesetas calcáreas y laderas configuradas por arenas caoliníferas con recubrimientos coluvionares de caliza. Los suelos son regosoles calcáricos, típicos de ambientes mediterráneos, poco propicios para el cultivo (Martín-Duque, et al., 2019).

Esta mina pertenece a la empresa SIBELCO, que comercializaba los materiales de la zona para producir vidrio y baldosas (Martín-Duque et al., 2019).



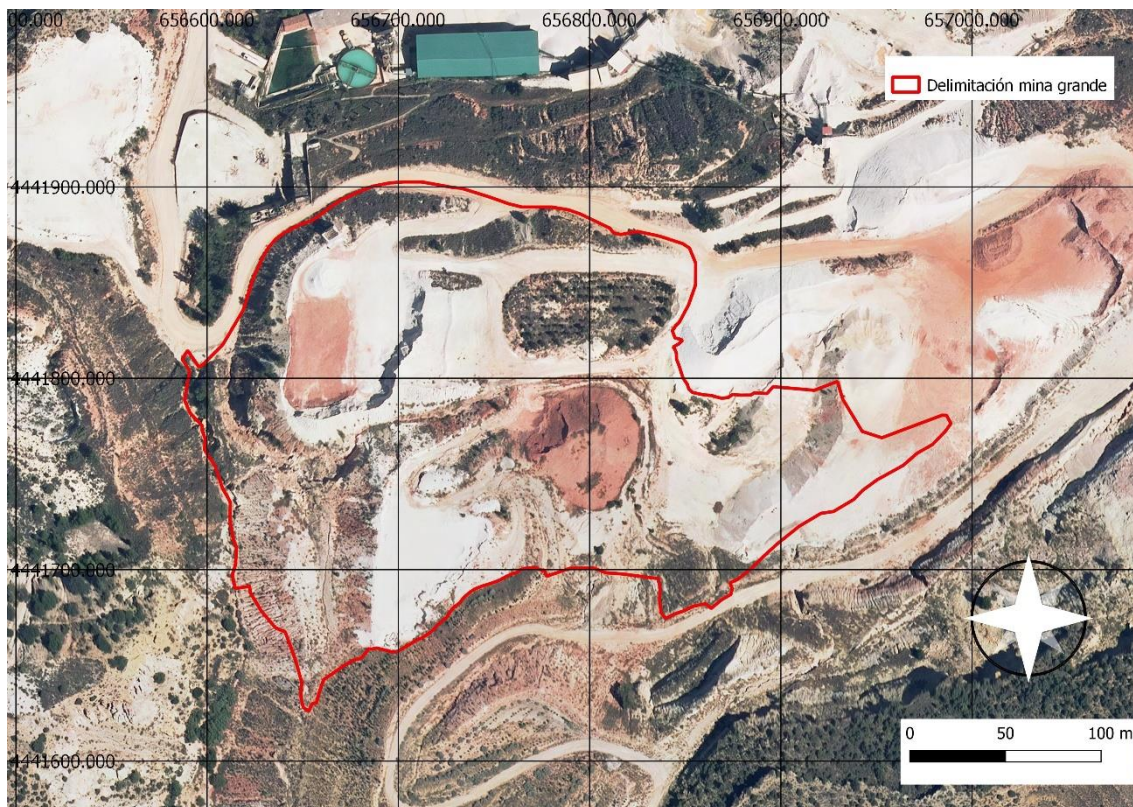


**Figura 1. Localización de la mina Fortuna**

Las actuaciones de restauración se han desarrollado en dos secciones (Figuras 2 y 3): una plataforma minera, llamada Z-Grande (ver anexo 1: Plano de localización de la sección Z-Grande) y una zona de talud con una pequeña plataforma, llamada Z-Pequeña (ver anexo 2: Plano de localización de la sección Z-Pequeña). La primera

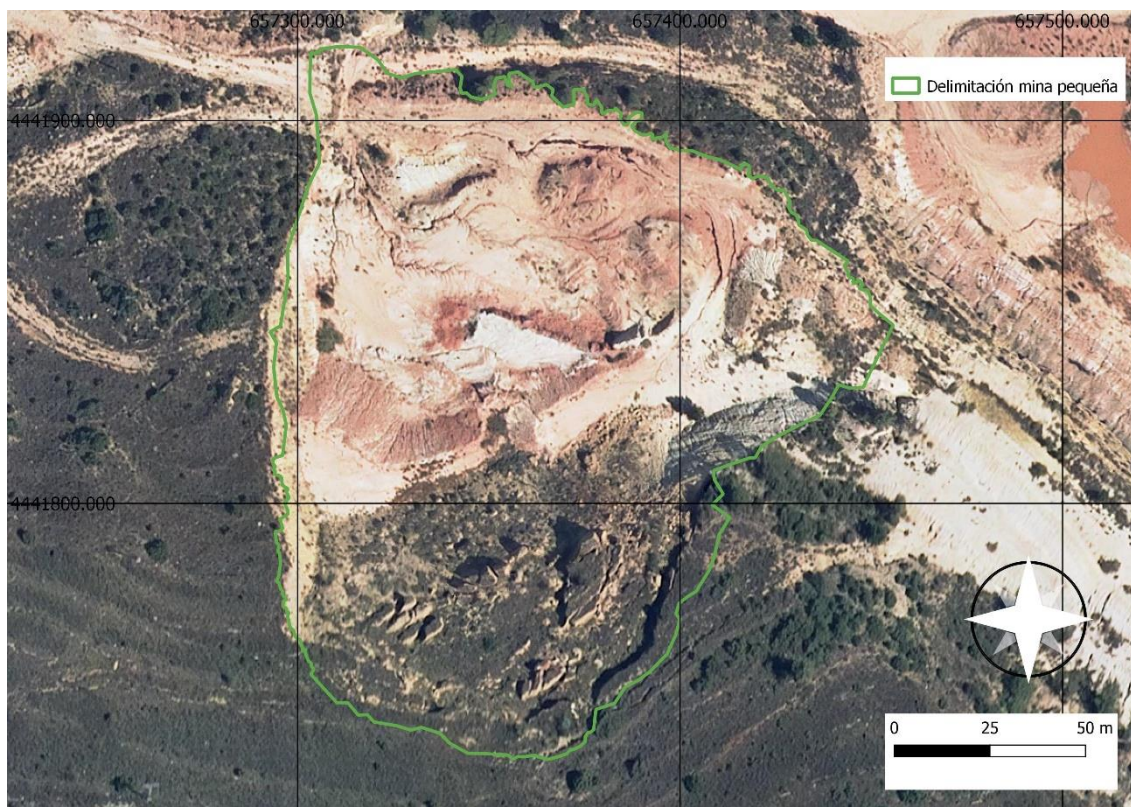


cuenta con un área de 5,91 ha, frente a la segunda, que abarca una superficie de 1,80 ha (Martin-Duque et al., 2019).



**Figura 2. Localización de la sección Z-Grande (antes de la restauración)**





**Figura 3. Localización de la sección Z-Pequeña (antes de la restauración)**

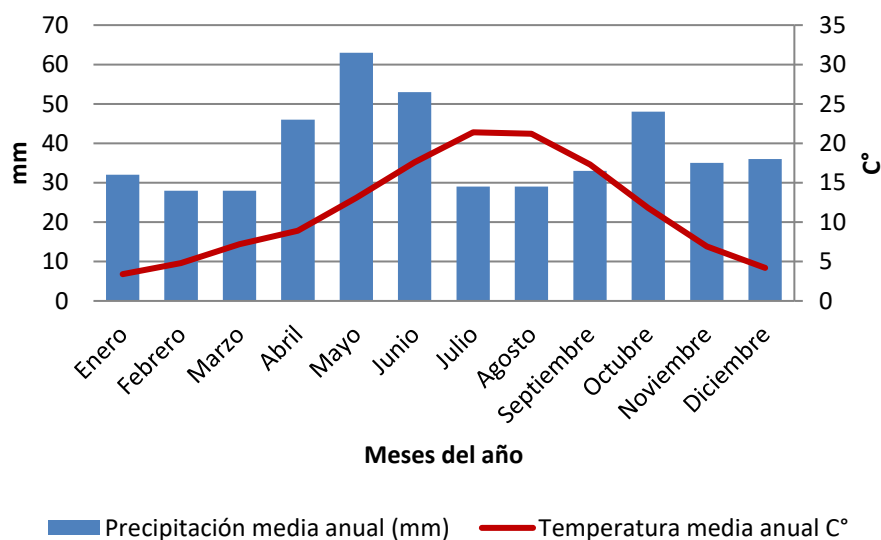
Dentro de Z-Grande, la restauración geomorfológica se llevó a cabo mediante dos aproximaciones diferentes debido al desnivel topográfico de las zonas. En la mayor parte de la superficie, se construyó un paisaje típico GeoFluv™ con colinas y cauces. Sin embargo, en el extremo occidental de la restauración, hubo que rehabilitar una antigua escombrera junto a un barranco, que no permitía establecer un paisaje GeoFluv™ canónico. La cuenca construida con su red de canales presenta unas pendientes más elevadas de las consideradas estables por este método. Esta zona se ha denominado: “No GeoFluv” (ver anexo 3: Plano de situación de los tipos de restauración geomorfológica en Z-Grande).

### 3.1. Clima

La mina se localiza en un ambiente mediterráneo-continental (Martín-Duque et al., 2019). Según la clasificación de Köppen (1918), esta zona corresponde al clima Cfb (clima templado sin estación seca y con veranos templados).

La temperatura media anual es de 11,5 C°, con máximos en el mes de julio y mínimos en enero. La precipitación media es de 463 mm/año, siendo mayo y junio los meses más lluviosos y julio y agosto, los meses más secos (Agencia Estatal de Meteorología,

2020). La evapotranspiración potencial (ETP) se sitúa entre los 600–700 mm/año, provocando un déficit hídrico en el territorio en los meses de verano (Figura 4) (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2011).



**Figura 4. Climograma de la zona de estudio. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología, 2020**

### 3.2. Referente geomorfológico

Uno de los primeros pasos de un diseño geomorfológico GeoFluv™ es la toma de datos en el denominado ecosistema de referencia, que ha de encontrarse cerca de la cantera, presentar materiales no consolidados similares a los de la mina y contener una red de drenaje desarrollada y estable. Estos paisajes maduros de referencia presentan pequeñas laderas redondeadas y pendientes sigmoidales (convexo-rectilíneo-cóncavas). En el caso de estudio, hubo ciertas dificultades para su elección.

Dado que los alrededores del yacimiento han sido altamente transformados por las actividades humanas a lo largo del tiempo, no se pudo obtener un buen ecosistema de referencia cercano con las cualidades necesarias para el proyecto, por lo que la restauración se ejecutó siguiendo los parámetros de ecosistemas similares, como es la mina El Machorro (Martin-Duque et al., 2019). La selección de este territorio como ecosistema de referencia se debió al hecho de pertenecer al mismo sistema geológico (Facies de Utrillas) y encontrarse a unos 100 km de la mina Fortuna.

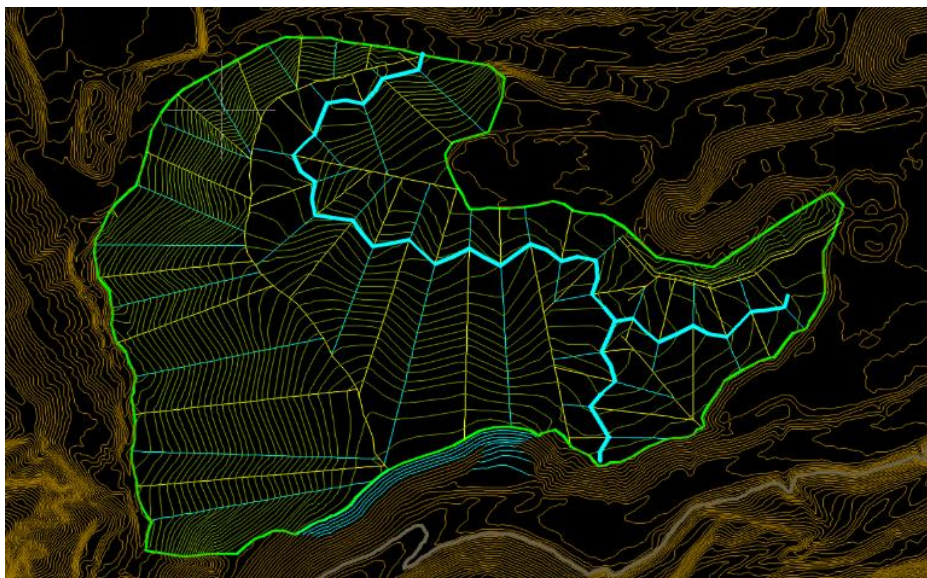


Los diseños GeoFluv™ se realizaron con datos morfológicos idénticos a la mina del Machorro (Zapico et al., 2018), pero con parámetros climáticos y topográficos propios del área de estudio.

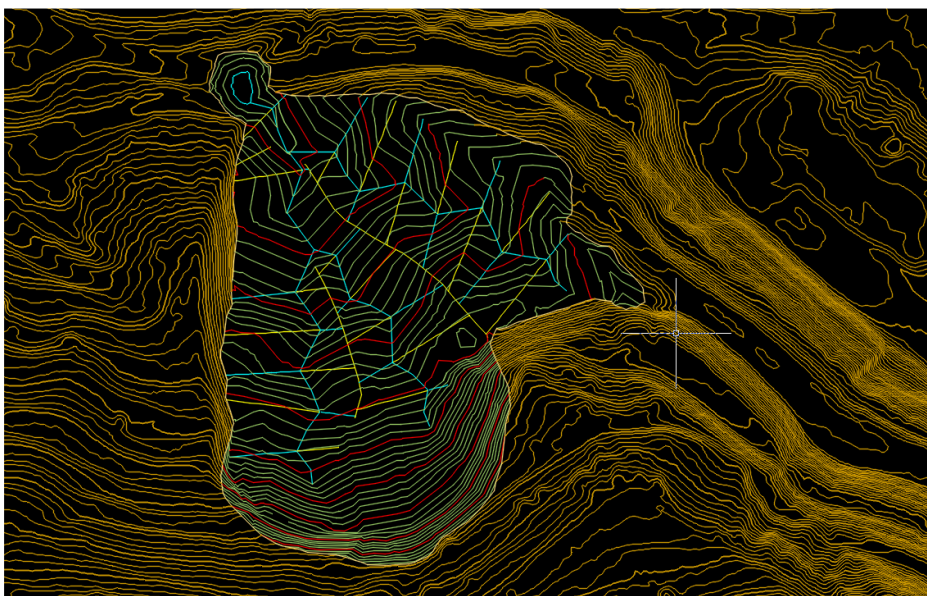
### 3.3. Restauración de la mina Fortuna

La restauración de la cantera se ejecutó con la intención de generar una topografía estable frente a la erosión. Las restauraciones anteriores en la zona seguían el modelo topográfico convencional formado por taludes y bermas. La inadecuada selección de sustratos (estériles de arenas y arcillas) y la erosividad del clima por las tormentas convectivas habían favorecido tasas de erosión muy elevadas (353 t/ha/año) y un escaso desarrollo de la vegetación (Martín-Duque et al., 2019).

El proyecto comenzó con el diseño GeoFluv™ en el verano de 2018 (Figuras 5 y 6) con el software *Natural Regrade*. Posteriormente, en septiembre de este mismo año, se inició el proceso de construcción de la nueva topografía y extensión de sustratos, finalizado en abril de 2019 (Figuras 7 y 8) (Martín-Duque et al., 2019).



**Figura 5. Diseño inicial GeoFluv de la sección Z-Grande. Fuente: Proyecto Life  
TECMINE, 2020**



**Figura 6. Diseño inicial GeoFluv de la sección Z-Pequeña. Fuente: Proyecto Life  
TECMINE, 2020**





**Figura 7 A. Sección Z-Grande antes de la restauración. Figura 7 B. Sección Z-Grande después del proceso de construcción. Fuente: Proyecto Life TECMINE, 2020**





**Figura 8 A. Sección Z-Pequeña antes de la restauración. Figura 8 B. Sección Z-Pequeña después del proceso de construcción. Fuente: Proyecto Life TECMINE, 2020**

El levantamiento de los nuevos accidentes geográficos comenzó con la modelización de las dos secciones. Para ello, el primer paso consistió en retirar parte de la piedra caliza que había en la mina.

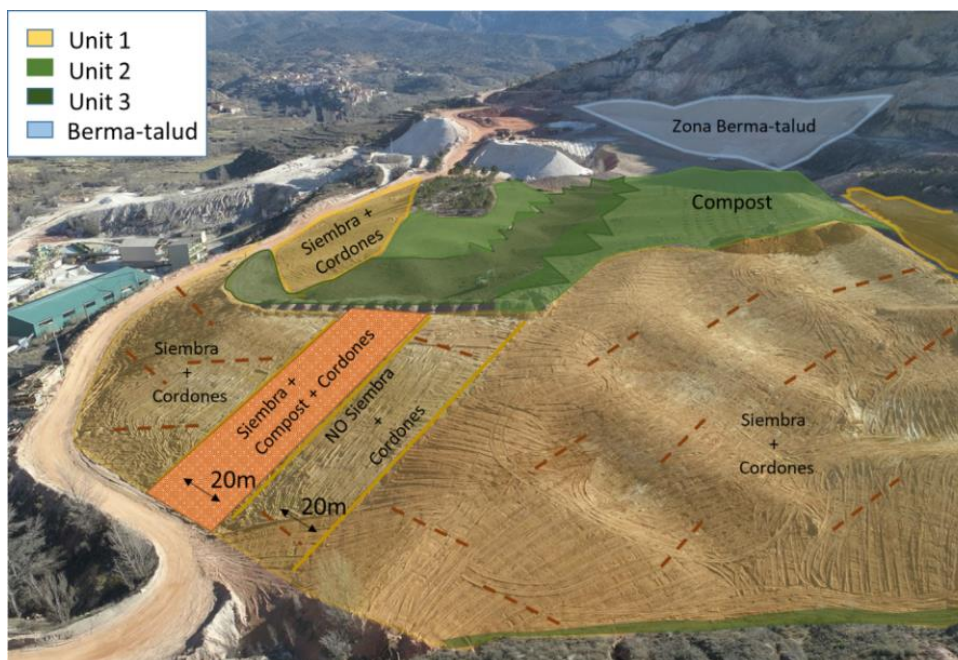
Posteriormente, para la conformación de la topografía se utilizaron materiales denominados estériles de mina, correspondientes a niveles de arenas y arcillas de la Formación Utrillas y niveles de caliza superiores. Como sustrato para cubrir las nuevas formas de relieve se utilizaron coluviones de las laderas naturales, los cuales presentan buenas propiedades físicas (5.691 m<sup>3</sup> se usaron para Z-Pequeña y 32.495 m<sup>3</sup> para Z-Grande). No obstante, algunas zonas quedaron recubiertas de estéril ante la escasez de coluvión (Martin-Duque et al., 2019).

En Z-Pequeña, y en la mayor parte de Z-Grande, se construyó un paisaje tipo GeoFluv™, formado por colinas suaves (lomas y vaguadas) y cauces. En el extremo oeste de Z-Grande no fue posible construir el típico relieve GeoFluv™ debido a la elevada pendiente y la falta de espacio. Se construyó una ladera de mayor pendiente con una red de drenaje en cauces, denominada “No GeoFluv”.

Después, se tendieron en gran parte del territorio lodos de depuradoras compostados para facilitar el desarrollo del suelo y de la vegetación (Martin-Duque et al., 2019).

La revegetación se llevó a cabo sectorizando el área en unidades y plantando diferentes especies (un ejemplo de las unidades de siembra se observa en la Figura 9). Para el presente trabajo, es necesario destacar que la revegetación de especies arbóreas y arbustivas se realizó con un ahoyado de 40x40 cm con microcuencas acopladas.





**Figura 9. Ejemplo de las unidades de revegetación en Z-Grande. Fuente: Proyecto Life TECMINE, 2020**

El estado de la restauración final se puede observar en los anexos 4 y 5: Restauración final de la sección Z-Grande; Restauración final de la sección Z-Pequeña.

#### 4. Material y métodos

Se han examinado y digitalizado los canales diseñados y los regueros formados en este último año para su posterior interpretación y el establecimiento de posibles soluciones sostenibles para los problemas derivados de los mismos. También se ha digitalizado la zona de estudio según algunos factores que influyen en la aparición de formas erosivas (porcentaje de suelo cubierto por vegetación, topografía, tipo de suelo utilizado en la restauración, carácter de los perfiles longitudinales de las laderas, inclinación de la pendiente y la creación de microcuencas de drenaje). Además, se han calculado las tasas de erosión anual.

Para la digitalización de las formas erosivas, se utilizaron como fuentes una ortofoto y una topografía elaborada mediante la técnica fotogramétrica *Structure from Motion* (Carrivick et al., 2016). Este procedimiento se basa en la creación de una nube de puntos densa a partir de fotos y puntos de control procesados con un *software* fotogramétrico. En este caso, los levantamientos en campo se realizaron en 2019 (al terminar las labores de restauración) y 2020 (un año después de terminar). Las

fotografías utilizadas fueron aéreas y se tomaron con un dron DJI, servicio contratado a la empresa DGDRONE ([www.dgdrone.com](http://www.dgdrone.com)). Los puntos de control se midieron con GPS diferencial y el posterior procesamiento lo realizó el grupo de investigación Restauración Geomorfológica ([www.restauraciongeomorfologica.com](http://www.restauraciongeomorfologica.com)). Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el *software* Agisoft Photoscan. Una vez obtenida la nube de puntos, se adquirieron otros dos productos topográficos (los utilizados en este trabajo), que fueron los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) y las ortofotos georreferenciadas, todos ellos en formato ráster. El manejo de esta metodología es la más empleada para observar cambios rápidamente en la superficie del terreno (Kou et al., 2020; Hancock et al., 2008).

El tratamiento y análisis de los MDE's y las ortofotos se realizaron mediante el programa QGIS, un software especializado en Sistemas de Información Geográfica. Todos los mapas, gráficos y tablas del presente trabajo son de elaboración propia.

#### **4.1. Cartografía y cuantificación de las formas erosivas, cauces restaurados y cubierta vegetal**

Usando como base el MDE de 2020 y su archivo *hillshade* (sombreado) asociado, se han cartografiado los cauces principales y formas erosivas secundarias con una profundidad mayor de 2 cm.

Aun así, muchos de los regueros presentes en la mina Fortuna creados en el último año no alcanzaron esta profundidad o la vegetación presente en el territorio contenía una alta frondosidad, por lo que no se apreciaban utilizando la técnica anterior (Wheaton et al., 2010). Para poder analizarlos, fue necesario visualizar la ortofoto de 2020 y examinar las curvas de nivel asociadas al terreno. Mediante la observación de dichos archivos, se estableció el recorrido de estos regueros, separando cada forma erosiva según su inicio. Estos datos fueron cohesionados más adelante con la digitalización de los factores. De esta forma, se observó la densidad de regueros por unidad de superficie y se pudo estimar la evolución de la erosión.

##### **Cubierta vegetal**

Para la digitalización de la cubierta vegetal, se estableció una clasificación según el porcentaje de vegetación en el suelo y la forma del relieve.

Así pues, se distingue entre suelo cubierto por vegetación, suelo desnudo, base de los canales restaurados, zona de alta densidad de regueros y balsa de sedimentos. La

distinción entre suelo cubierto por vegetación y suelo desnudo se realizó mediante la visualización de la ortofoto de 2020. Si se observaba un porcentaje mayor de 30% de vegetación en la zona, se clasifica como suelo cubierto por vegetación y, si el porcentaje era menor, como suelo desnudo. En el caso de que la densidad de regueros fuera alta, se clasifica la sección como zona de alta densidad de regueros.

#### 4.2. Estimación del efecto erosivo provocado por los factores implicados en el ecosistema

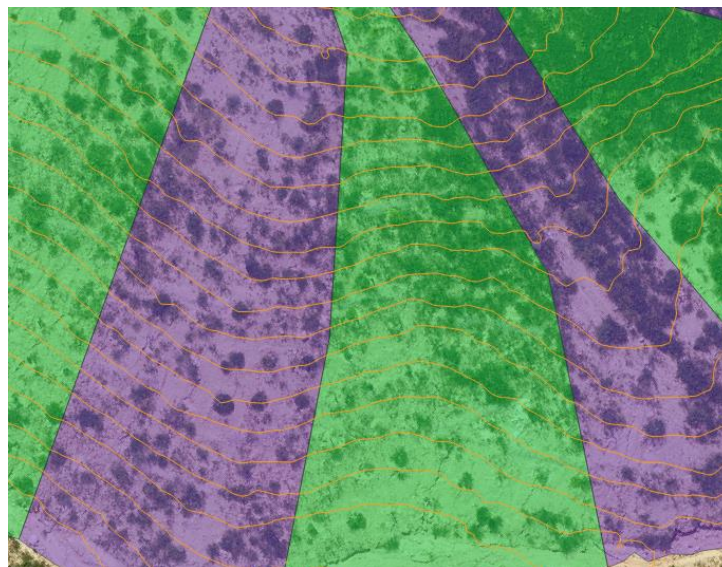
Se llevó a cabo una salida de campo en el mes de julio para el reconocimiento de la zona y de los diferentes factores que influyen en la erosión, analizando previamente las ortofotos creadas en 2019 y 2020. Más tarde, mediante el programa QGIS, se dibujaron distintas áreas dentro de Z-Grande y Z-Pequeña con la creación de nuevas capas de extensión *shape* (shp). Aunque toda la digitalización se ejecutó con el mismo programa, la caracterización de cada factor se efectuó mediante diferentes herramientas.

Una vez digitalizadas todas las parcelas de interés para el trabajo, se exportaron los datos de superficie del terreno y el número y la longitud de los regueros para cada factor en formato xls. Su tratamiento se realizó con el programa *Excel*. En los factores donde el número de muestras fueran significativas (“Lomas y vaguadas” y “Perfiles longitudinales de las laderas”) se realizó su estadística con el programa *Statgraphic*.

##### Lomas y vaguadas

En las laderas se distinguen dos formas de relieve principales: lomas (divisorias) y vaguadas (concavidades). Para realizar esta topografía, se crearon curvas de nivel de 0,5 metros sobre el MDE de 2020 y se analizó su sentido y sinuosidad (ver ejemplo en la Figura 10). Los tramos convexos hacen referencia a lomas y los cóncavos a vaguadas.





**Figura 10. Ejemplo de los criterios utilizados para la digitalización de lomas y vaguadas. Las parcelas moradas corresponden a las lomas y las verdes a las vaguadas.**

#### Tipo de sustrato utilizado

Los datos necesarios para la interpretación del tipo de sustrato utilizado (coluvión/estéril) fueron recogidos durante el trabajo de campo mediante la observación directa y el estudio de la zona a través de la ortofoto de 2020.

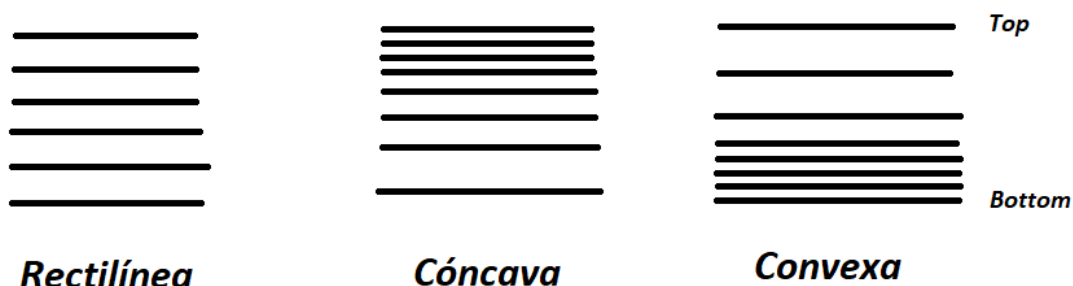
#### Pendiente

Para la clasificación de la inclinación de la pendiente, se creó, a partir del MDE de 2020, un mapa de pendientes (*slope*) y se reclasificó siguiendo los parámetros de Kou et al., 2020. Las clases que se consideraron fueron las siguientes: de 0° a 10°, de 10° a 20°, de 20° a 45° y mayor de 45°.

#### Perfiles longitudinales de las laderas

Existen diferentes tipos de perfiles longitudinales de las laderas en la naturaleza. El contorno que siguen las laderas puede ser de aspecto convexo, cóncavo o rectilíneo. Esta característica influye en la creación de formas erosivas en el terreno. En este caso, el término “convexo” englobará el perfil sigmoidal (convexo-rectilíneo-cóncavo) (Nicolau, 2003a), “cóncavo” tendrá un perfil rectilíneo-cóncavo y “rectilíneo” se compondrá de uno lineal. El cálculo de la pendiente de los perfiles de las laderas se realizó mediante dos métodos. En un principio, se digitalizaron los perfiles longitudinales creando curvas de nivel de 0,5 metros sobre el MDE de 2020 y se observó el sentido de cada isolínea (Figura 11). En los lugares donde no se apreciaba

claramente el comportamiento de la ladera, se utilizó la herramienta *Profile Tool* del programa QGIS.



**Figura 11. Posición de las curvas de nivel dependiendo del perfil longitudinal que tenga el territorio. Fuente: Ramón Sánchez Donoso (comunicación personal)**

#### 4.3. Determinación de la tasa de erosión anual

Para definir el valor de este factor, fue necesario observar los cambios geomorfológicos aparentes en la mina mediante la comparación directa de los dos MDEs de 2019 y 2020. Este proceso se efectuó mediante los *Digital Elevation of Differences* (DoDs) (archivos ráster que representan la diferencia de elevación entre ambas topografías). Estos ficheros no hacen una mera comparación directa del relieve, sino que también, tienen en cuenta el grado de exactitud de cada topografía, es decir, cuánto se parecen a la realidad. Este proceso se realizó mediante el *software* y la metodología *Geomorphic Change Detection* (Wheaton et al., 2010). Éste permite traducir las diferencias de las elevaciones de los DoDs a volúmenes y asignarles un valor de incertidumbre basado en los errores inherentes a cualquier producto topográfico.

Se ha elegido esta herramienta por su sencillez, aunque su aplicación presenta algunos problemas. Por un lado, está la dificultad de visualizar en los MDE's la diferencia entre vegetación y suelo desnudo (Wheaton et al., 2010). Aunque se intentó eliminar el efecto de este factor en los datos generados, es muy complicado suprimirlo por completo, por lo que los cambios volumétricos, en parte, corresponden al crecimiento de las plantas y no a un cambio geomorfológico en la zona. Este es un problema ampliamente reconocido cuando se trabaja con topografías derivadas de productos fotográficos. Además, en territorios recién restaurados, el suelo soporta diferentes cambios de elevación no sujetos a la erosión del terreno, pero que se registran con los DoDs. Éstos se deben a la presencia o ausencia de agua y cambios

de temperatura (Vericat et al., 2014). Para reducir el efecto de estos problemas, las comparaciones se han centrado en zonas con grandes signos de erosión y poca vegetación.

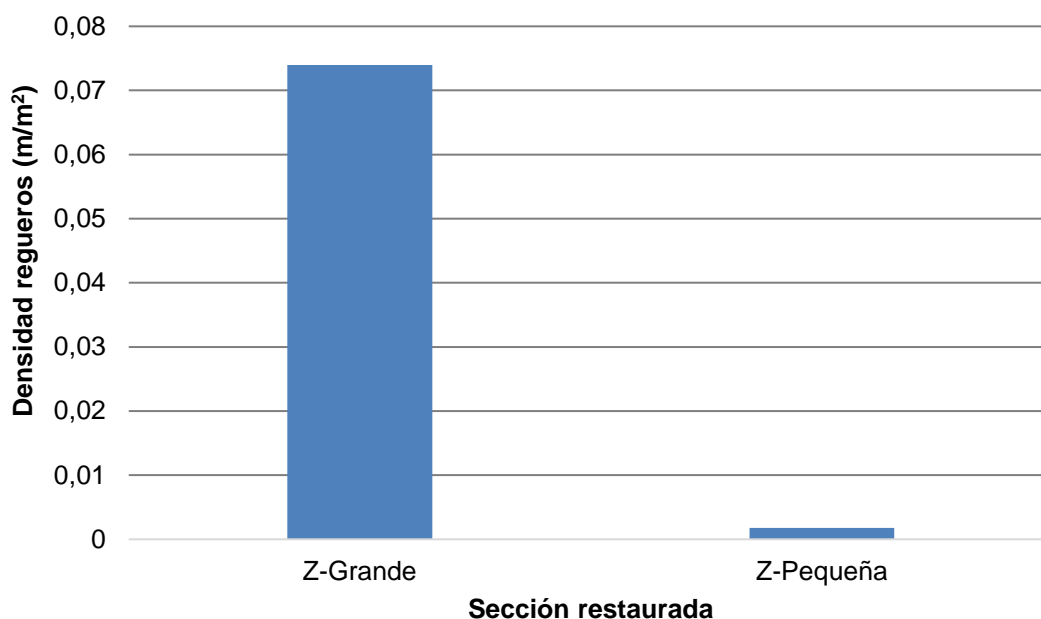
## 5. Resultados

### 5.1. Cuantificación de los regueros

Dentro de Z-Grande se han identificado y cartografiado 780 regueros (ver anexo 6: Plano de situación de los regueros en Z-Grande), y, en Z-Pequeña, 7 (ver anexo 7: Plano de situación de los regueros en Z-Pequeña). En total, se determinaron 787 regueros en la mina. En la Tabla 1 y la Figura 12 se visualizan los resultados obtenidos de la digitalización. Se observa que la densidad de regueros es muy superior en Z-Grande.

**Tabla 1. Superficie y número, longitud y densidad de regueros en las secciones de la mina Fortuna**

Sección	Superficie (m <sup>2</sup> )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Z-Grande	59100	780	4371	0,074
Z-Pequeña	20160	7	36	0,0018



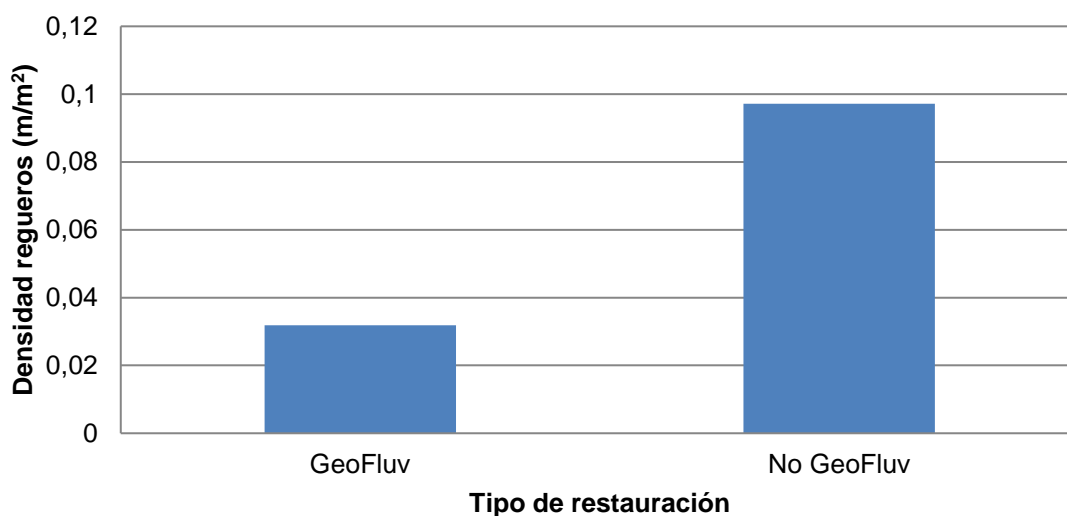
**Figura 12. Comparación de la densidad de regueros ( $\text{m}/\text{m}^2$ ) entre las secciones restauradas**

#### Regueros en la sección Z-Grande: Restauración “GeoFluv” y “No GeoFluv”

Los resultados obtenidos en el análisis de los regueros localizados en Z-Grande se muestran en la Tabla 2. Si se observa esta tabla, junto con la Figura 13, se comprueba que tanto el número de regueros como la longitud de estos aumenta en la zona “No GeoFluv”.

**Tabla 2. Superficie de la zona de estudio y número, longitud y densidad de los regueros en la sección Z-Grande**

Tipo de restauración	Superficie ( $\text{m}^2$ )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad ( $\text{m}/\text{m}^2$ )
GeoFluv	33072	206	1054,29	0,032
No GeoFluv	21059	259	2046,48	0,097



**Figura 13. Comparación entre la densidad de regueros ( $m/m^2$ ) entre la restauración "GeoFluv" y "No GeoFluv" en la sección Z-Grande**

### Cubierta vegetal

Dentro de la mina Fortuna, se ha digitalizado la cobertura del suelo para cada sección (ver anexos 8 y 9: Plano de situación de la cubierta del suelo en Z-Grande; Plano de situación de la cubierta del suelo en Z-Pequeña).

En las Tablas 3 y 4 se muestra el porcentaje de suelo cubierto por vegetación en cada sección. Tanto los planos integrados en los anexos, como las tablas, nos indican que el porcentaje de vegetación supera en las dos secciones el 50% de suelo cubierto por vegetación.

**Tabla 3. Porcentaje total de la cobertura vegetal en Z-Grande**

Superficie	Área ( $m^2$ )	Porcentaje total (%)
Z-Grande	58844,15	100
Suelo cubierto por vegetación	30231,85	51

**Tabla 4. Porcentaje total de la cobertura vegetal en Z-Pequeña**

Superficie	Área ( $m^2$ )	Porcentaje total (%)
Z-Pequeña	13433,48	100
Suelo cubierto por vegetación	9117,62	68

## 5.2. Evolución de los perfiles longitudinales de regueros y canales

### Canales restaurados

Los canales (restaurados y no restaurados) localizados actualmente en Z-Pequeña son los siguientes (ver anexo 10: Plano de situación de los canales restaurados en la sección Z-Pequeña):

1. Canal no restaurado: cuneta localizada fuera de la cuenca restaurada (en el lateral oeste), que recoge escorrentías externas y evitando la entrada de agua en la restauración. Desemboca directamente en la balsa de sedimentos.
2. Canal central “GeoFluv”: construido mediante el método GeoFluv™. Se encuentra situado en el centro de la secciones Z-Pequeña, desembocando en el Canal derecho “GeoFluv”. Recibe un pequeño cauce restaurado denominado el anexo 8 como Ramificación del canal central “GeoFluv”.
3. Canal derecho “GeoFluv”: construido mediante el método GeoFluv™. Se localiza en el lado derecho de la cantera y desemboca en la balsa de sedimentos.

Los dos cauces fluviales construidos en Z-Grande son los siguientes (ver anexo 11: Plano de situación de los canales restaurados en la sección Z-Grande):

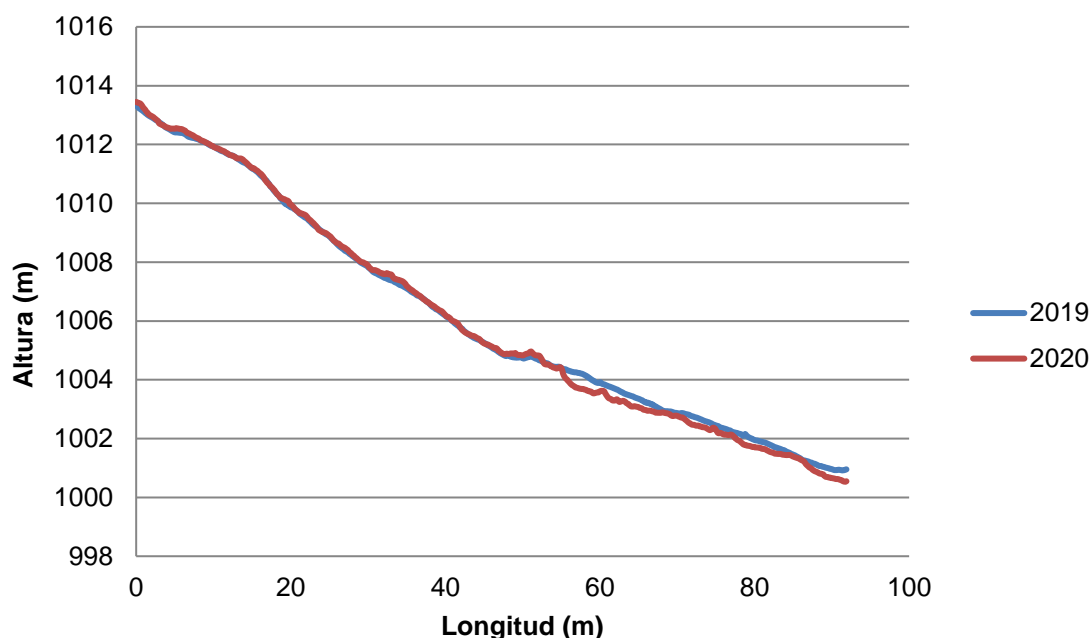
1. Canal “GeoFluv”: canal restaurado mediante el método GeoFluv™. Su nacimiento comienza en el sector de los taludes convencionales, recorriendo prácticamente toda la zona y desembocando en la cuneta de desagüe de la restauración.
2. Canal “No GeoFluv”: debido a la difícil topografía del terreno, este cauce no pudo ser restaurado siguiendo el método anterior, por lo que se propuso crear diferentes lomas y vaguadas junto con un canal en forma de “zigzag”. Tiene su nacimiento en la parte oeste del territorio y desemboca en un barranco natural tributario del río Riodeva.

La comparación entre los perfiles longitudinales de cada canal entre los años 2019 y 2020 se observa en las siguientes gráficas.

La Figura 14 representa los perfiles longitudinales obtenidos del canal central de Z-Pequeña restaurado a partir del método GeoFluv™ en los años 2019 (color azul) y

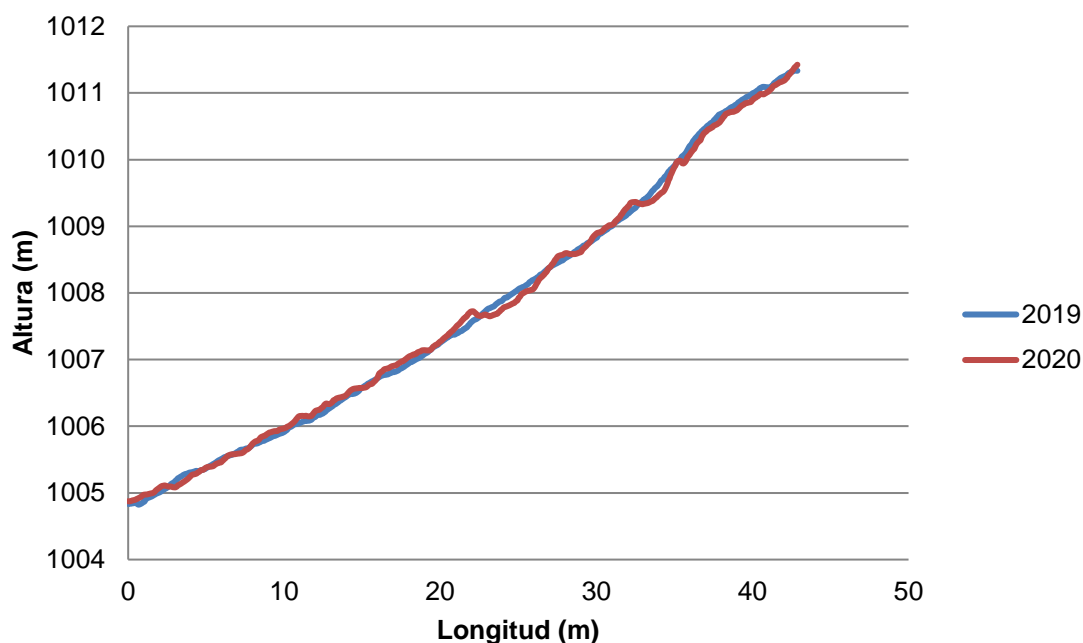


2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. Se observa encajamiento en el año 2020 a lo largo de un tramo de 35 m a partir de los 56 metros de longitud.



**Figura 14. Perfiles longitudinales del canal central “GeoFluv” de la sección restaurada Z-Pequeña entre 2019 y 2020**

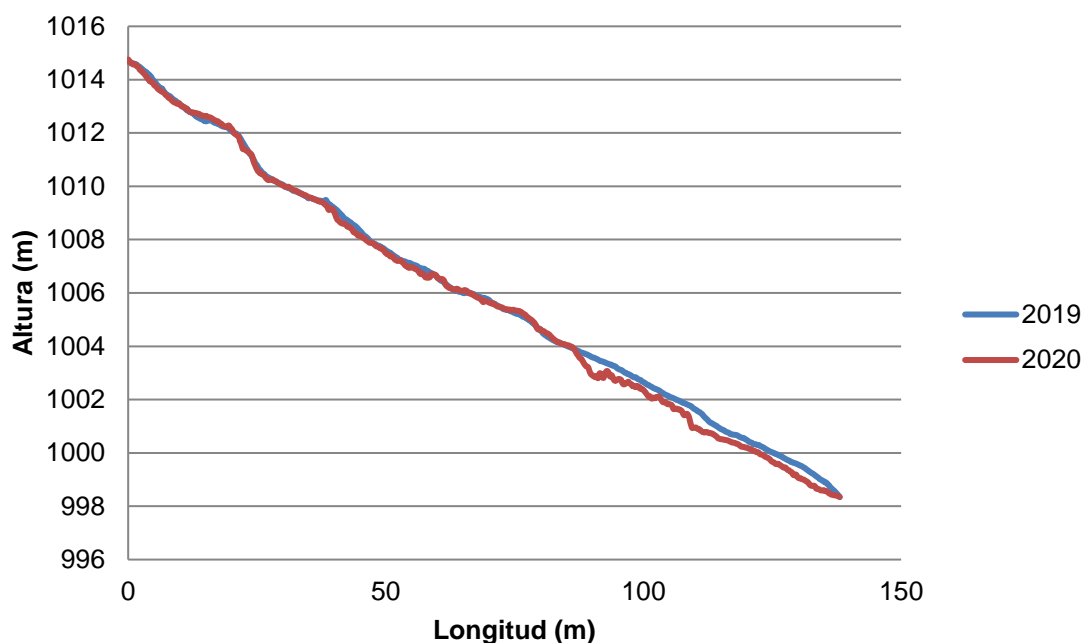
La Figura 15 representa los perfiles longitudinales obtenidos de la ramificación del canal central de Z-Pequeña restaurado a partir del método GeoFluv™ en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. Se observa un cambio de pendiente en el año 2020, con erosión en algunos puntos del canal y sedimentación en otros.



**Figura 15. Perfiles longitudinales de la ramificación del canal central “GeoFluv” en la sección restaurada Z-Pequeña entre los años 2019 y 2020**

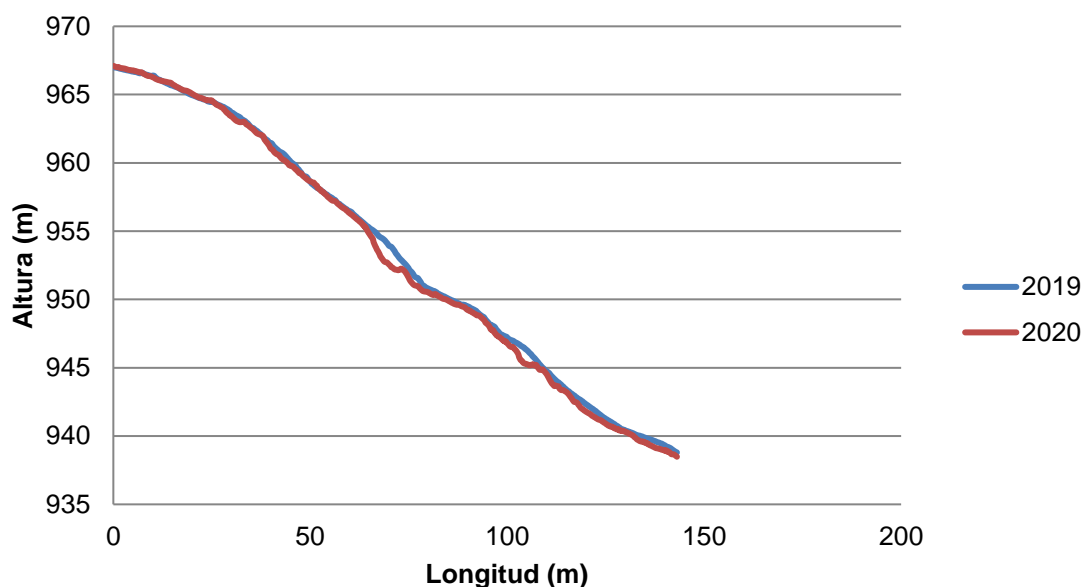
La Figura 16 representa los perfiles longitudinales obtenidos del canal derecho de Z-Pequeña restaurado a partir del método GeoFluv™ en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. Se observa encajamiento en un tramo de 47 m de longitud a partir de los 86 metros.





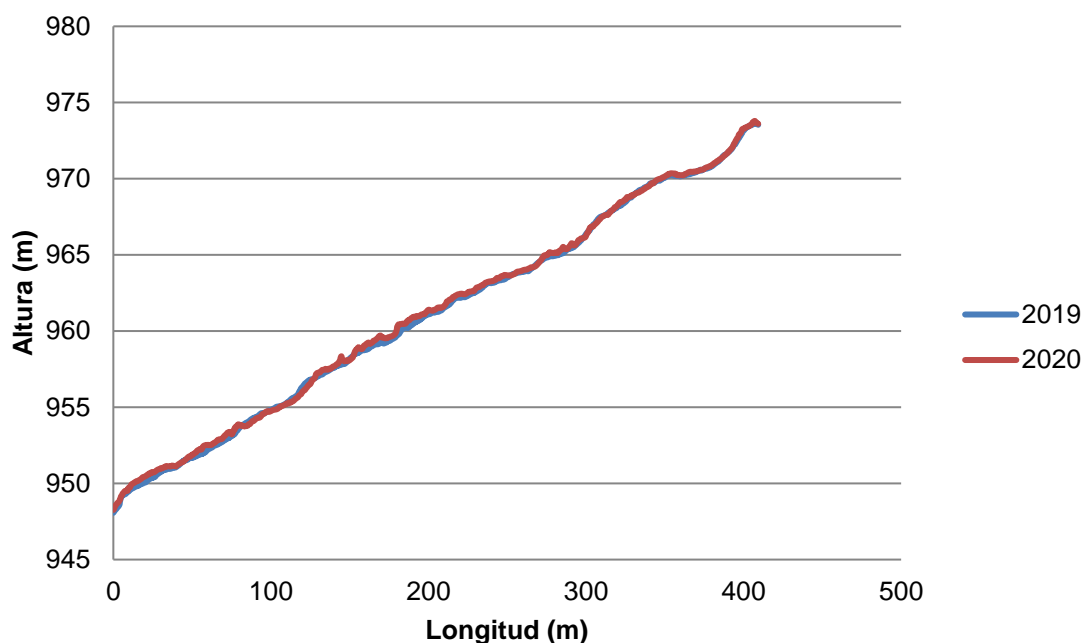
**Figura 16. Perfiles longitudinales del canal derecho “GeoFluv” en la sección restaurada Z-Pequeña entre los años 2019 y 2020**

La Figura 17 representa los perfiles longitudinales obtenidos del canal restaurado “No GeoFluv” en Z-Grande en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. En este canal se observa una erosión creciente en el año 2020 entre las longitudes 65-77 metros y 102-110 metros.



**Figura 17. Perfiles longitudinales del canal restaurado “No GeoFluv” de la sección Z-Grande entre 2019 y 2020**

La Figura 18 representa los perfiles longitudinales obtenidos del canal principal restaurado mediante el método GeoFluv™ en Z-Grande en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. En este canal principal no se observan grandes cambios entre los perfiles de 2019 y 2020. Puede llegar a haber una sedimentación en el canal en el último año.



**Figura 18. Perfiles longitudinales del canal restaurado “GeoFluv” en la sección Z-Grande entre los años 2019 y 2020**

En la Tabla 5 se recoge el promedio de pérdida de suelo en profundidad medido en metros entre los perfiles de 2019 y 2020.

**Tabla 5. Promedio de pérdida de profundidad (en metros) entre los años 2019 y 2020**

Canal	Promedio de pérdida de profundidad (en m) <sup>1</sup>
Canal central “GeoFluv” (Z-Pequeña)	0,07
Ramificación del canal central “GeoFluv” (Z-Pequeña)	0,002
Canal derecho “GeoFluv” (Z-Pequeña)	0,17
Canal “No GeoFluv” (Z-Grande)	0,28
Canal “GeoFluv” (Z-Grande)	-0,12

1. Los datos positivos corresponden al promedio de pérdida total de sedimento. En el caso de datos negativos, significará que habido una acumulación de sedimentos en el cauce.

### Regueros de más de 2 cm de profundidad

En la sección Z-Pequeña, se visualizan una pequeña cantidad de regueros destacados (ver anexo 12: Plano de situación de los regueros más importantes de la sección Z-Pequeña). Para poder analizarlos, se han dividido en:

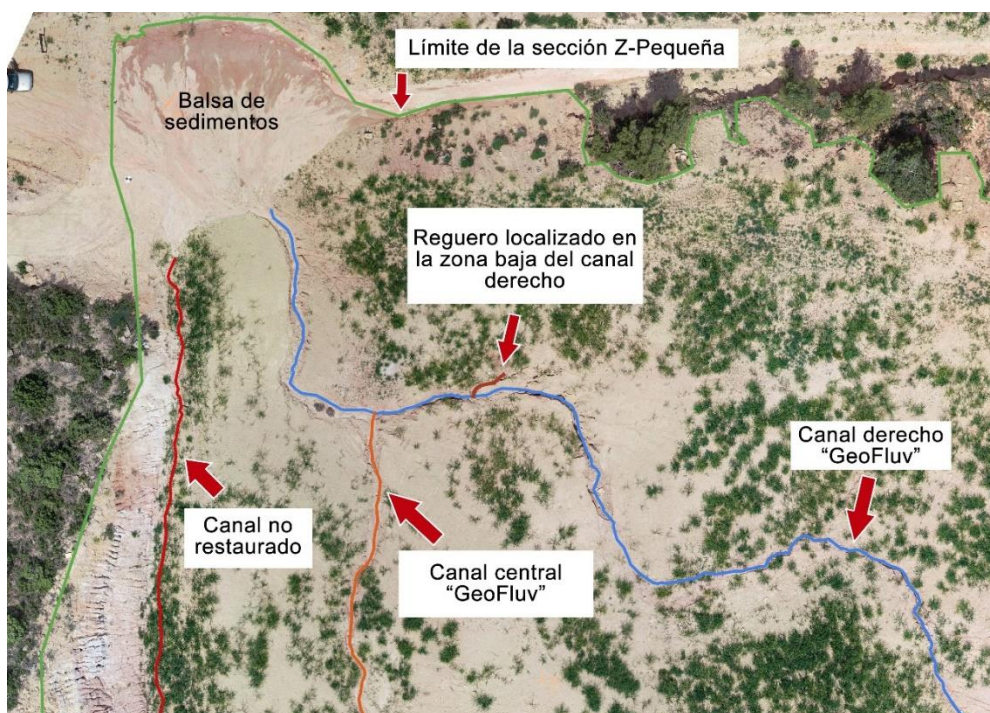
1. Reguero localizado en la zona alta del canal derecho (Figura 19).



**Figura 19. Localización del reguero ubicado en la zona alta del canal derecho**

2. Reguero localizado en la zona baja del canal derecho (Figura 20).



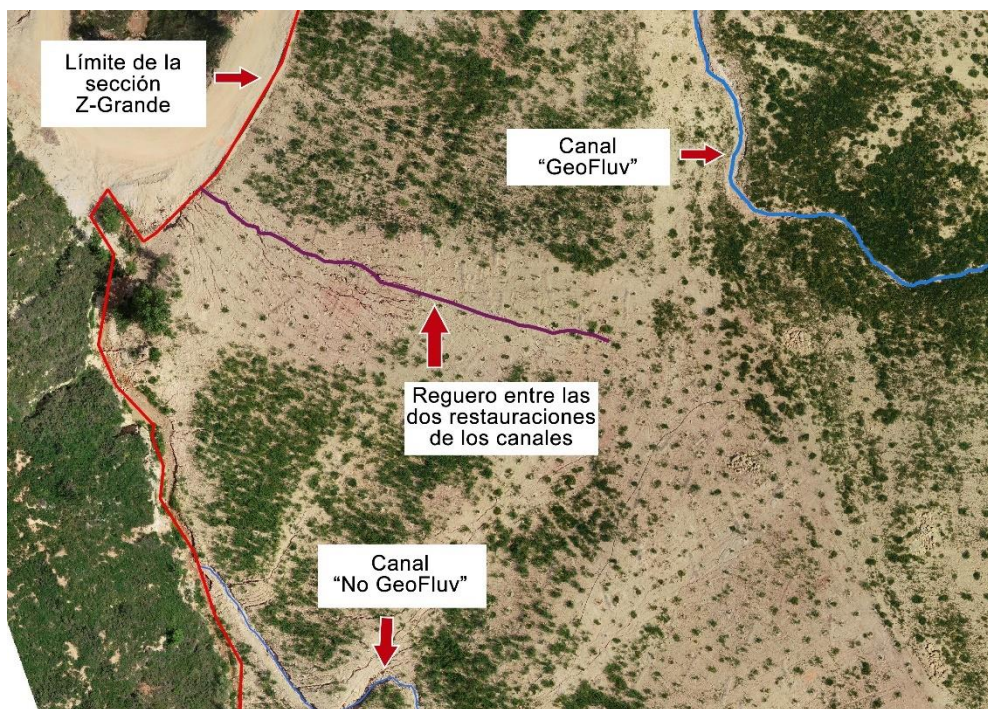


**Figura 20. Localización del reguero ubicado en la zona baja del canal derecho**

A diferencia de la sección anterior, en Z-Grande se observan una alta densidad de regueros. Sin embargo, destacan en la cantera las siguientes formas erosivas (ver anexo 13: Plano de situación de los regueros más importantes de la sección Z-Grande):

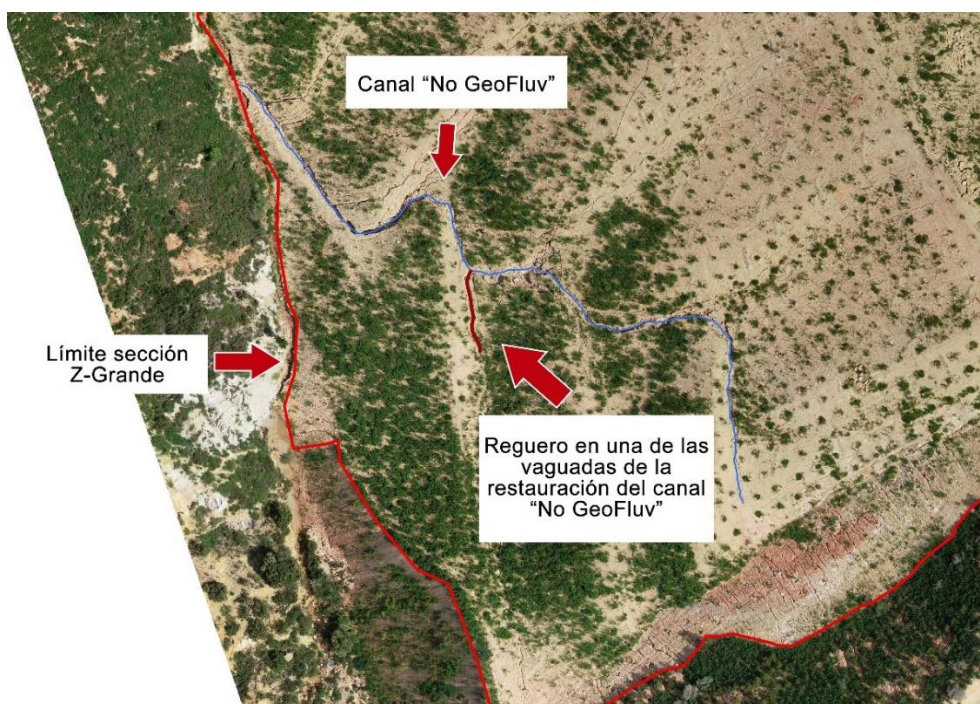
1. Reguero entre las dos restauraciones de los canales: se trata de uno de los más acentuados de esta mina. Se localiza en un área en la que no se aplicaron ni lodos de depuradora ni revegetación (Figura 21).





**Figura 21. Localización del reguero ubicado entre las dos restauraciones de los canales**

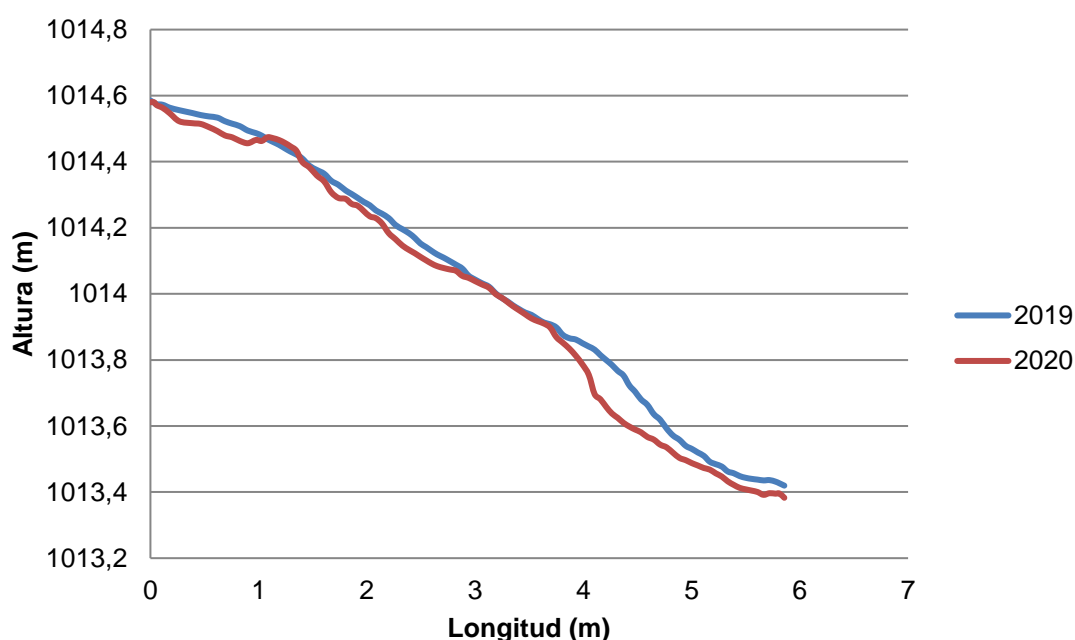
2. Reguero en una de las vaguadas de la restauración del canal "No GeoFluv" (Figura 22).



**Figura 22. Localización del reguero ubicado en una de las vaguadas de la restauración del canal "No GeoFluv"**

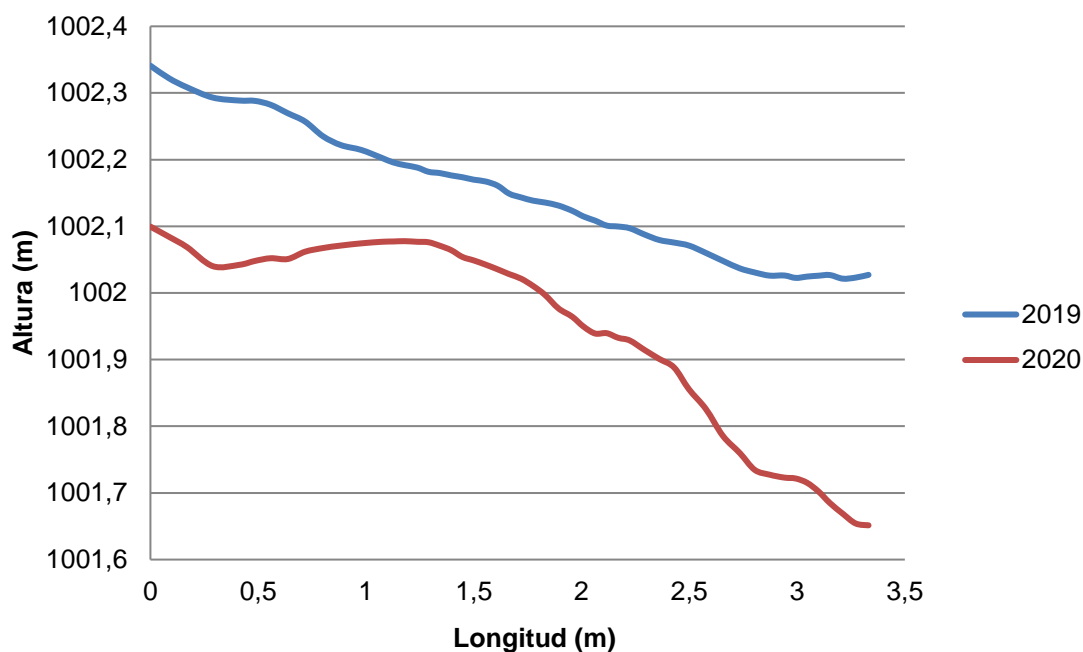
La comparación entre los perfiles longitudinales de cada reguero entre los años 2019 y 2020 se observa en las siguientes gráficas.

La Figura 23 representa los perfiles longitudinales pertenecientes al reguero localizado en la parte alta del canal derecho de Z-Pequeña en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. Se observa un encajamiento a lo largo de todo el perfil para el año 2020, excepto en las longitudes entre 1,24 – 1,53 y 2,99 – 3,87 metros, en donde no se modifica el perfil.



**Figura 23. Perfil longitudinal del reguero localizado en la zona alta del canal derecho de la sección Z-Pequeña entre los años 2019 y 2020**

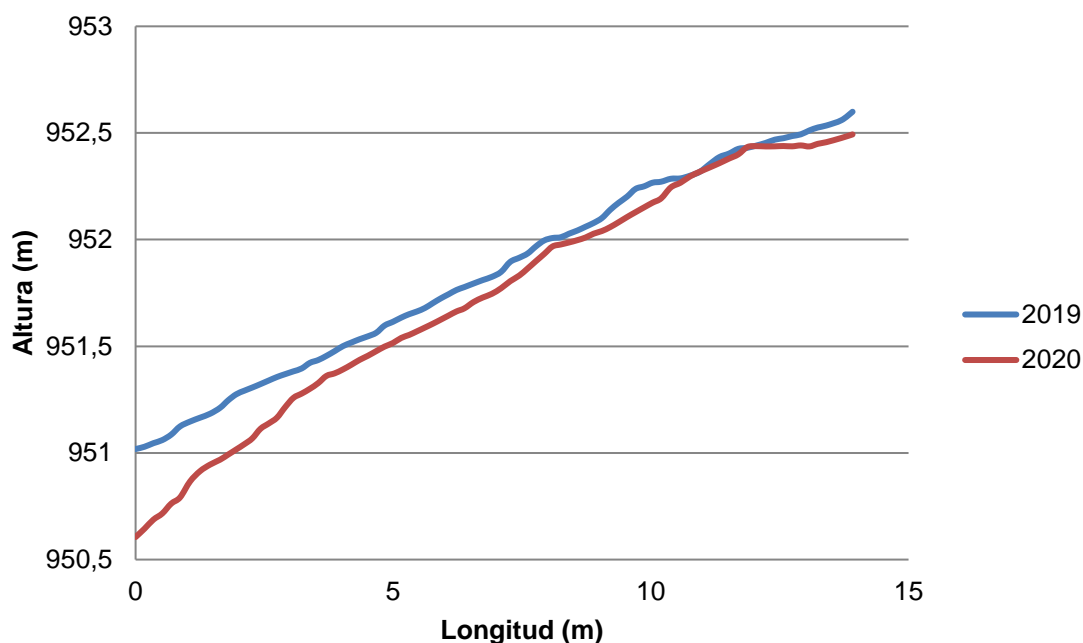
La Figura 24 representa los perfiles longitudinales obtenidos del reguero localizado en la zona baja del canal derecho de Z-Pequeña en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. En general, se observa una diferencia entre los perfiles de 2019 y 2020 de casi 0,5 metros en todo su recorrido. Hay una clara erosión en este punto del territorio.



**Figura 24. Perfil longitudinal del reguero localizado en la zona baja del canal derecho de la sección Z-Pequeña entre los años 2019 y 2020**

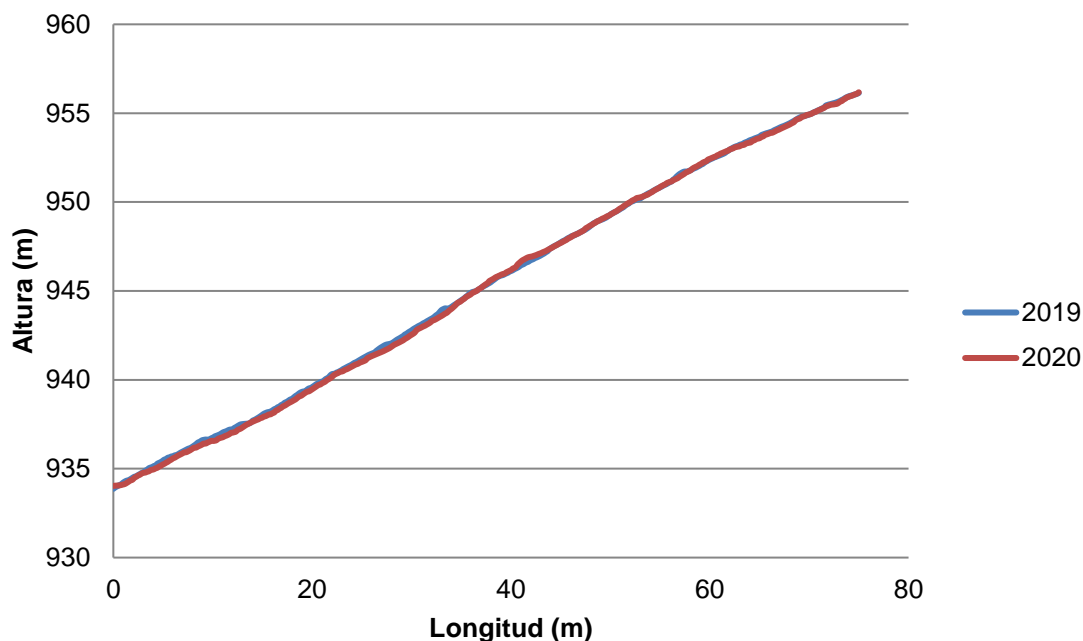
La Figura 25 representa los perfiles longitudinales del reguero localizado en la última vaguada del lado izquierdo que desemboca en el canal “No GeoFluv” en Z-Grande en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. En este perfil se observa claros rasgos de erosión. En toda la gráfica predomina una pérdida de sedimento entre el año 2019 y 2020, a excepción de un punto donde las líneas convergen (entre los 10,76 – 12,05 metros de longitud).





**Figura 25. Perfil longitudinal del reguero localizado en una de las vaguadas de la restauración del canal “No GeoFluv” en la sección Z-Grande entre los años 2019 y 2020**

La Figura 26 representa los perfiles longitudinales obtenidos del reguero localizado entre las dos restauraciones del canal en Z-Grande en los años 2019 (color azul) y 2020 (color rojo). En el eje X se halla la longitud del canal medido en metros. En el eje Y se localiza la altura del canal medida en metros. No se observan cambios significativos entre los perfiles de los diferentes años, pero destaca la gran longitud que tiene este reguero.



**Figura 26. Perfil longitudinal del reguero localizado entre las dos restauraciones en la sección Z-Grande entre los años 2019 y 2020**

En la Tabla 6 se recoge el promedio de pérdida de suelo en profundidad medido en metros entre los perfiles de 2019 y 2020.

**Tabla 6. Promedio de pérdida de profundidad (en metros) en los regueros entre los años 2019 y 2020**

Reguero	Promedio de pérdida de profundidad (en m) <sup>1</sup>
Reguero localizado en la zona alta del canal derecho (Z-Pequeña)	0,04
Reguero localizado en la zona baja del canal derecho (Z-Pequeña)	0,2
Reguero localizado en una de las vaguadas de la restauración del canal "No GeoFluv"	0,12
Reguero localizado entre las dos restauraciones	0,07

1. Los datos positivos corresponden al promedio de pérdida total de sedimento. En el caso de datos negativos, significará que habido una acumulación de sedimentos en el cauce.

### 5.3. Efecto erosivo de los factores del ecosistema

La división del terreno según los diferentes parámetros que afectan a la estabilidad de la mina se presenta en este trabajo por medio de distintos planos temáticos (incluidos en los anexos), tablas y gráficos. Debido a los escasos regueros a analizar en Z-Pequeña, el trabajo se centrará en el estudio de las formas erosivas en Z-Grande.

#### Efectos del tipo de forma de relieve (loma y vaguada) sobre la densidad de regueros

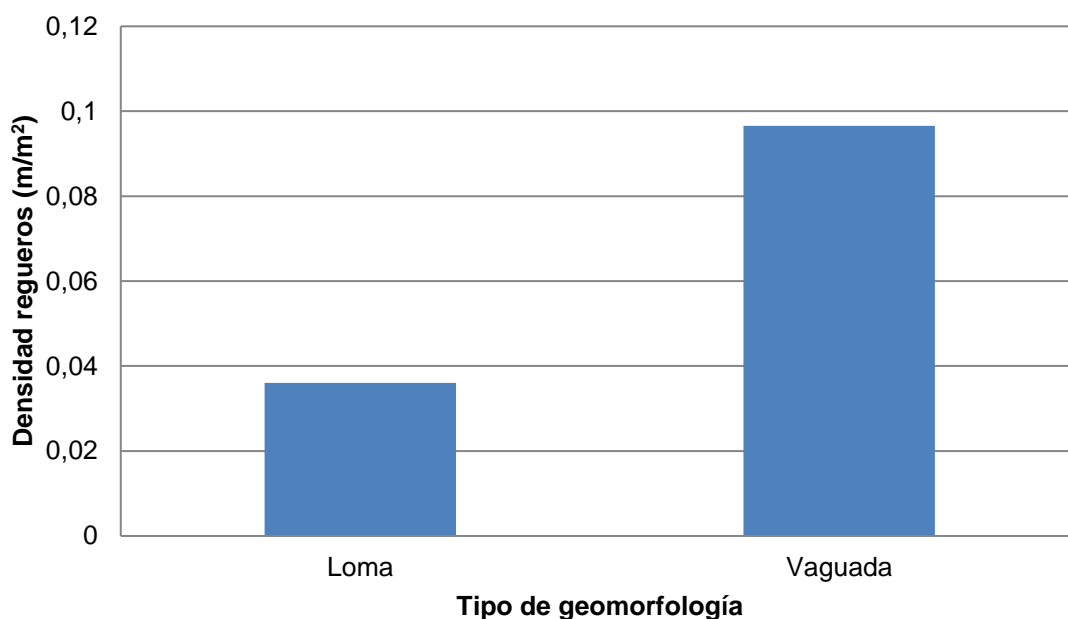
En las Tablas 7 y 8 se representan los datos recogidos de la digitalización y análisis de las laderas para Z-Grande y Z-Pequeña (ver anexos 14 y 15: Plano de situación de las lomas y vaguadas en la sección Z-Grande; Plano de situación de las lomas y vaguadas en la sección Z-Pequeña). En la Figura 26 se observa la representación gráfica de los datos para Z-Grande, donde se visualiza que la densidad es superior en las vaguadas (entre 3 y 5 veces).

**Tabla 7. Superficie de las formas geomorfológicas y cantidad, longitud y densidad de los regueros localizados en la sección Z-Grande**

Forma geomorfológica	Superficie (m <sup>2</sup> )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Loma	21729	156	782,56	0,036
Vaguada	25047	378	2419,55	0,097

**Tabla 8. Superficie de las formas geomorfológicas y cantidad, longitud y densidad de los regueros localizados en la sección Z-Pequeña**

Forma geomorfológica	Superficie (m <sup>2</sup> )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Loma	5512	1	6,26	0,0014
Vaguada	3973	6	29,92	0,0075



**Figura 26. Comparación entre la densidad de regueros ( $\text{m/m}^2$ ) para las lomas y vaguadas en Z-Grande**

En la Tabla 9 se observa el resumen estadístico de la relación entre la distancia de los regueros y las lomas y vaguadas de Z-Grande. En la Figura 27 se visualiza el Diagrama de Cajas y Bigotes. Debido a que las longitudes no siguen un valor normal, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para observar si los datos obtenidos eran significativos (Tabla 10).

**Tabla 9. Resumen estadístico de la longitud media de los regueros en las lomas y vaguadas de Z-Grande**

Nombre	Recuento	Promedio	Desviación Estándar
Loma	37	21,1502	36,7973
Vaguada	36	67,2096	125,654
Total	73	43,8644	94,2858

Nombre	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Loma	173,981%	0	162,487	162,487
Vaguada	186,958%	0	644,858	644,858
Total	214,948%	0	644,858	644,858

Nombre	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Loma	5,71462	6,98155
Vaguada	7,72598	15,1684
Total	14,6282	40,0279

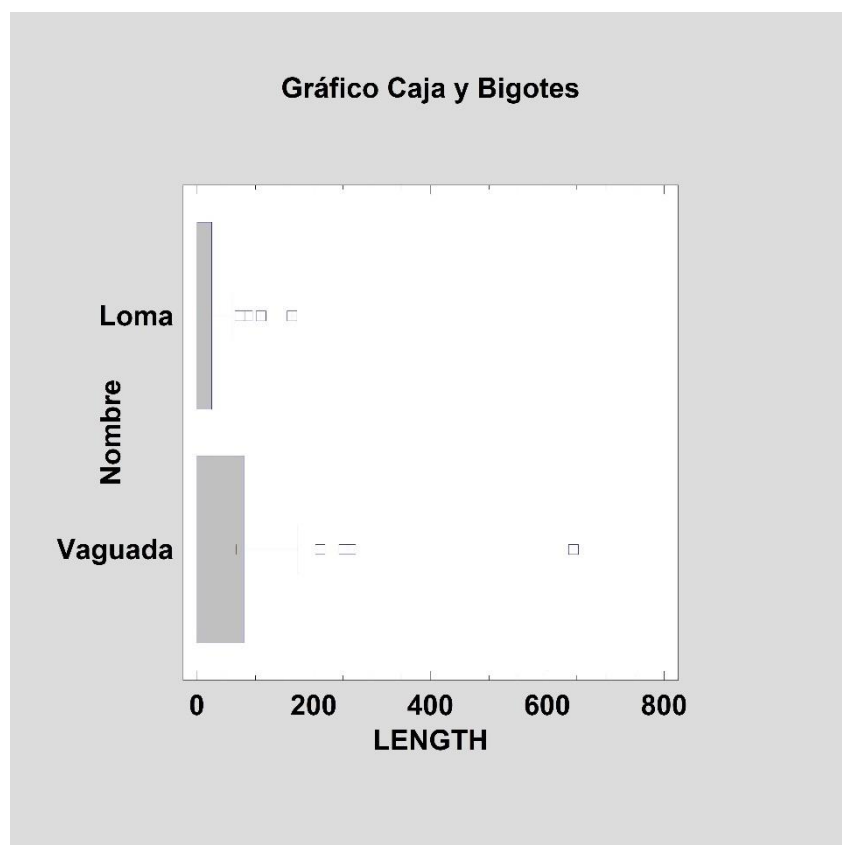


Figura 27. Diagrama de Cajas y Bigotes para las lomas y vaguadas de Z-Grande

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para la longitud media de los regueros en las lomas y vaguadas de Z-Grande

Nombre	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Loma	37	33,8919
Vaguada	36	40,1944

Estadístico = 1,7738 Valor-P = 0,18291

intervalos de confianza del 95,0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Loma - Vaguada		-6,30255	9,7352

\* indica una diferencia significativa.

En el caso de Z-Grande, se encuentra una media de longitud de regueros por unidad de superficie de 0,1 m/m<sup>2</sup> en las vaguadas, y menor de 0,04 m/m<sup>2</sup> para las lomas. Aun así, estos datos no son significativos (Tabla 10), ya que el valor p es mayor de 0,05.

#### Efecto del tipo de sustrato (coluvión y estéril) sobre la densidad de regueros

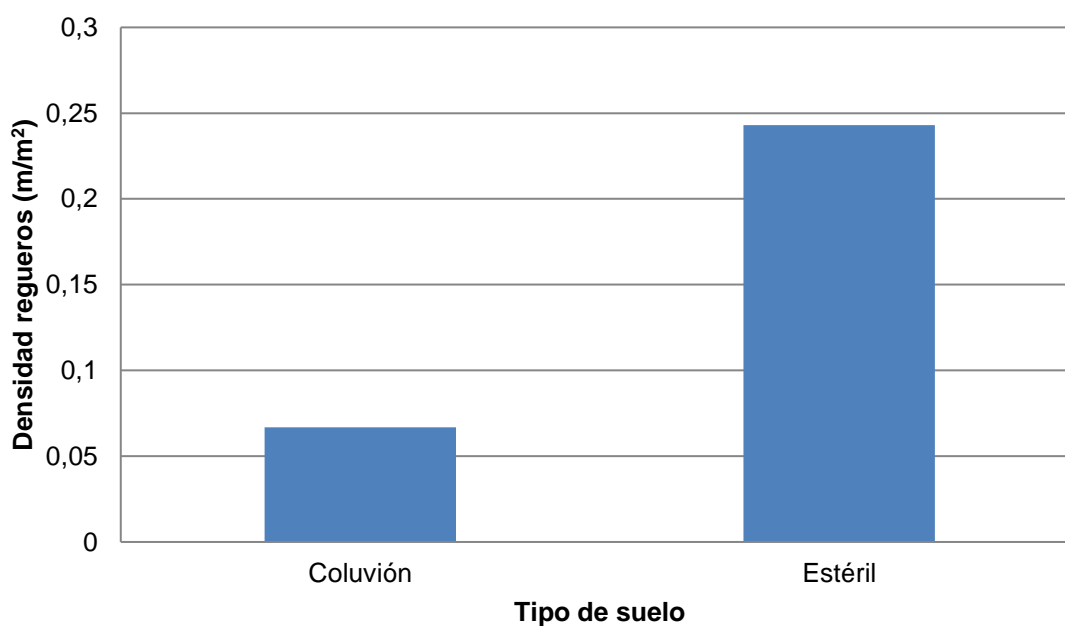
Dentro de la mina Z-Grande, el coluvión de piedra caliza ocupa 5,31 ha y el estéril, 0,33 ha (ver anexo 16: Plano de situación del tipo de suelo utilizado en la sección Z-

Grande). Por otra parte, en la mina Z-Pequeña, el área del coluvión es de 0,92 ha y el estéril de 0,2 ha (ver anexo 17: Plano de situación del tipo de suelo utilizado en la sección Z-Pequeña).

La Tabla 11 y la Figura 28 muestran que la densidad de regueros en Z-Grande es elevadamente superior en el estéril que en el coluvión (un orden de magnitud).

**Tabla 11. Superficie del tipo de suelo y cantidad, longitud y densidad de regueros en la zona Z-Grande**

Tipo de suelo	Superficie (m <sup>2</sup> )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Estéril	3287	153	798,63	0,24
Coluvión	53142	627	3554,89	0,067



**Figura 28. Comparación entre la densidad de regueros (m/m<sup>2</sup>) en los diferentes tipos de suelo utilizados en la restauración de Z-Grande**

#### Efecto de la pendiente de ladera sobre la densidad de regueros

La pendiente clasificada para Z-Grande y Z-Pequeña según los criterios de Kou et al., 2020 se observa en los anexos 18 y 19: Plano de situación de la inclinación de la pendiente en Z-Grande; Plano de situación de la inclinación de la pendiente en Z-Pequeña.

El efecto de la pendiente de ladera sobre la densidad de regueros en Z-Grande y Z-Pequeña se muestra en las Tablas 12 y 13. En la Figura 29 se observa que, en Z-Grande, el rango de pendiente entre 20° y 45° desarrolla mayor densidad de regueros.

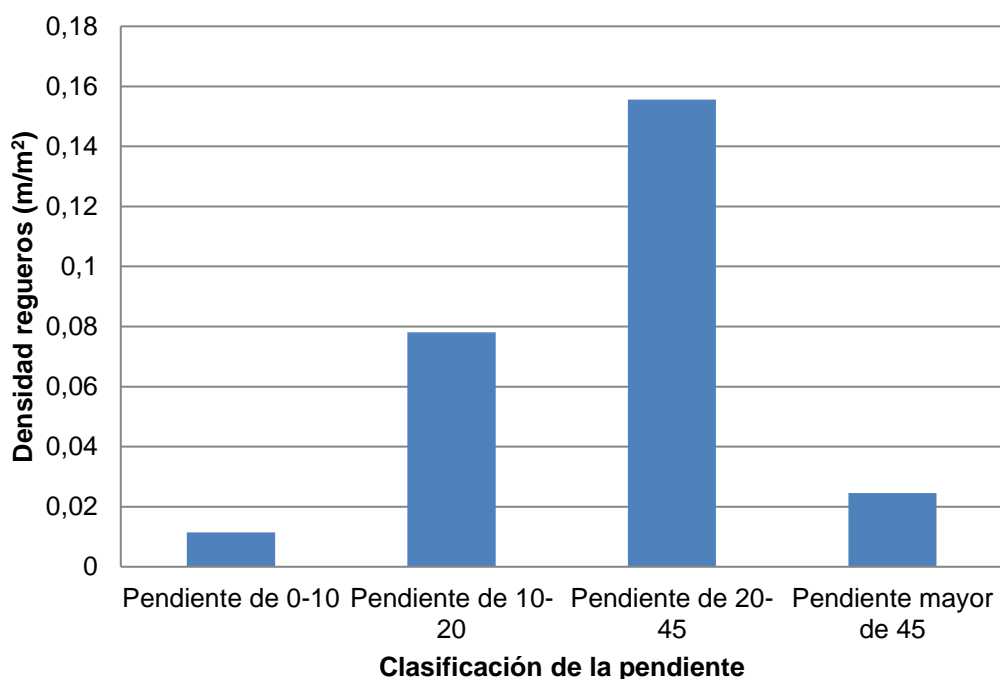
**Tabla 12. Superficie de las pendientes y longitud y densidad de los regueros en la zona Z-Grande**

Pendiente (en grados)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Pendiente de 0-10	3287	196,47	0,06
Pendiente de 10-20	53142	2093,91	0,039
Pendiente de 20-45	13195	2053,13	0,16
Pendiente de más de 45	502	12,32	0,025

**Tabla 13. Superficie de las pendientes y longitud y densidad de los regueros en la zona Z-Pequeña**

Pendiente (en grados)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Pendiente de 0-10	2774	2,235	0,0008
Pendiente de 10-20	7060	19,585	0,0028
Pendiente de 20-45	7504	14,36	0,0019
Pendiente de más de 45	1354	0	0





**Figura 29. Comparación entre la densidad de regueros ( $\text{m/m}^2$ ) de las diferentes pendientes en Z-Grande**

#### Efecto del perfil longitudinal de ladera (convexo, cóncavo y rectilíneo) sobre la densidad de regueros

Los perfiles longitudinales principales de Z-Grande y Z-Pequeña se pueden observar en los anexos 20 y 21: Plano de situación de los perfiles longitudinales en Z-Grande; Plano de situación de los perfiles longitudinales en Z-Pequeña.

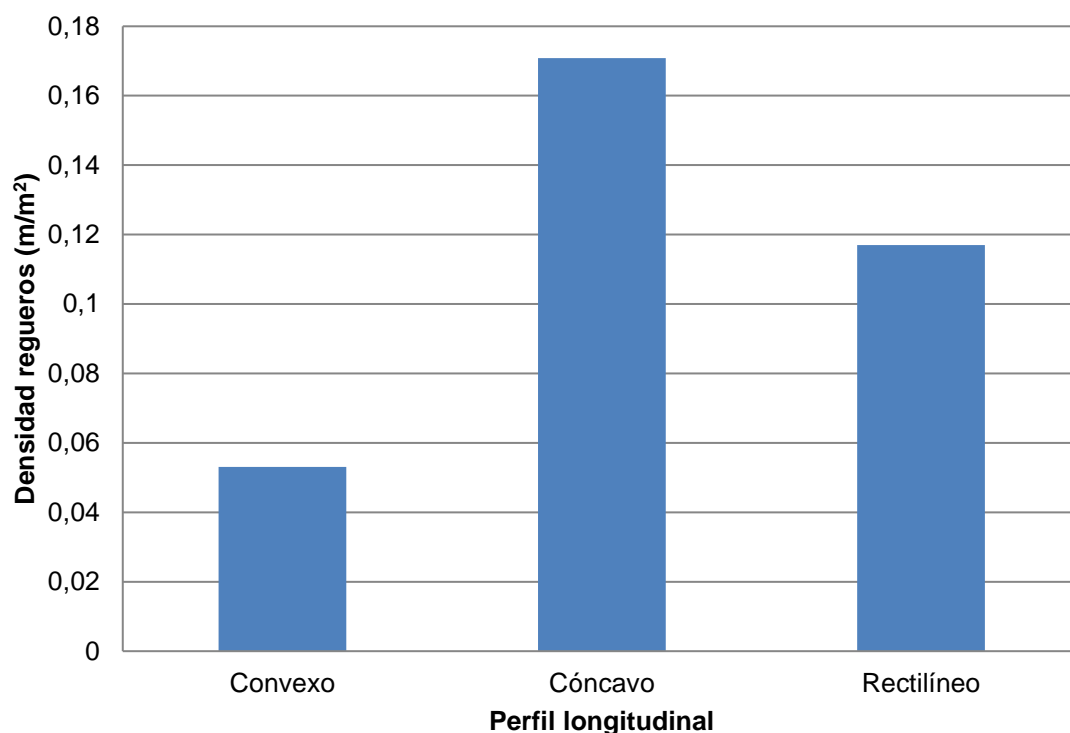
El efecto del perfil longitudinal de ladera sobre la densidad de regueros en Z-Grande y Z-Pequeña se muestra en las Tablas 14 y 15. En la Figura 30 se observa que, en Z-Grande, los perfiles cóncavo y rectilíneo desarrollan una mayor densidad de regueros.

**Tabla 14. Superficie de los perfiles y número, longitud y densidad de los regueros dentro de Z-Grande**

Tipo de perfil	Superficie ( $\text{m}^2$ )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad ( $\text{m/m}^2$ )
Convexo	30417	236	1615	0,053
Cóncavo	6771	305	1156,83	0,17
Rectilíneo	13472	239	1576,46	0,117

**Tabla 15. Superficie de los perfiles y número, longitud y densidad de los regueros dentro de Z-Pequeña**

Tipo de perfil	Superficie (m <sup>2</sup> )	Nº de regueros	Longitud de los regueros (m)	Densidad (m/m <sup>2</sup> )
Convexo	5325	3	15,5	0,0029
Cóncavo	2514	1	6,26	0,00249
Rectilíneo	12045	3	14,03	0,00116



**Figura 30. Comparación entre la densidad de los regueros (m/m<sup>2</sup>) de los diferentes perfiles longitudinales en Z-Grande**

En la Tabla 16 se observa el resumen estadístico de la relación entre la longitud de los regueros y la inclinación de los perfiles longitudinales de Z-Grande. En la Figura 31 se visualiza el Diagrama de Cajas y Bigotes. Debido a que los datos no siguen un valor normal, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para observar si los datos obtenidos eran significativos (Tabla 17).

Tabla 16. Resumen estadístico para la inclinación del perfil longitudinal en las dos secciones

Nombre	Recuento	Promedio	Desviación Estándar
Convexa	20	80,7251	173,552
Cóncava	5	231,365	510,363
Rectilínea	16	98,5285	102,654
Total	41	106,044	215,899

Nombre	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Convexa	214,992%	0	764,008	764,008
Cóncava	220,587%	0	1144,28	1144,28
Rectilínea	104,187%	0	300,618	300,618
Total	203,594%	0	1144,28	1144,28

Nombre	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Convexa	6,53164	12,7123
Cóncava	2,04067	2,28114
Rectilínea	0,97118	-0,843657
Total	9,52787	19,4334

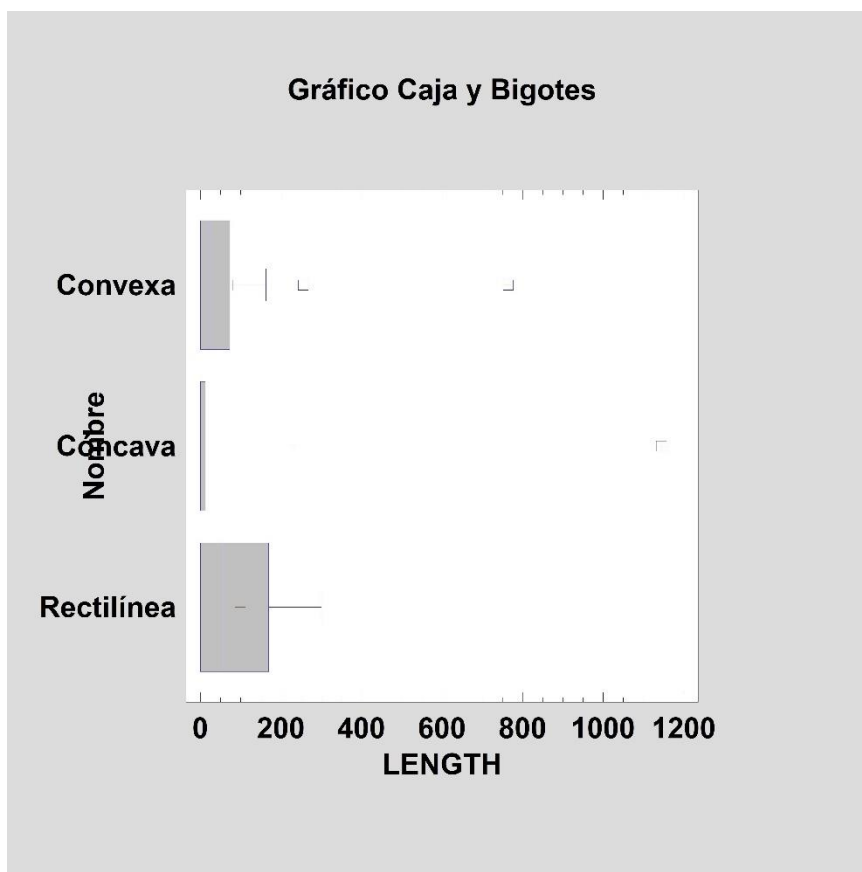


Figura 31. Diagrama de Cajas y Bigotes para los perfiles longitudinales

**Tabla 17. Prueba de Kruskal-Wallis para la inclinación de los perfiles longitudinales en las dos secciones**

Nombre	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Convexa	20	20,3
Cóncava	5	16,1
Rectilínea	16	23,4063

Estadístico = 1,61444 Valor-P = 0,446096

intervalos de confianza del 95,0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Convexa - Cóncava		4,2	14,3389
Convexa - Rectilínea		-3,10625	9,61886
Cóncava - Rectilínea		-7,30625	14,693

\* indica una diferencia significativa.

Las mayores formas erosivas en Z-Grande se localizan en perfiles convexos, localizados en su mayoría en los taludes convencionales. En este caso, la longitud media por unidad de superficie supera los 0,16 m/m<sup>2</sup>. Aun así, los datos no son significativos (Tabla 17), ya que p es mayor de 0,05.

#### 5.4. Tasas de erosión anual

Debido a los problemas asociados con el cálculo de este factor, se ha elegido un número de zonas donde la vegetación era escasa y las formas erosivas estaban pronunciadas:

- Z-Grande (un total de 1,74 ha): laderas restauradas con otros parámetros (1.27 ha), talud convencional (0.47 ha). Estas zonas también se han visto afectadas por el crecimiento de la vegetación. En este caso los valores de aporte no son significativos, pero sí los de erosión.
- Z-Pequeña: balsa de sedimentos (0.03 ha).

En la Tabla 17 se muestran los resultados volumétricos de dichos sectores.



**Tabla 17. Comparación volumétrica en las restauraciones de la mina Fortuna**

Comparación	Fecha inicial	Fecha final	Volumen aporte m <sup>3</sup> +/- error	Volumen erosión +/- error m <sup>3</sup>	Balance m <sup>3</sup> +/- error
Balsa de sedimentos (Z-Pequeña)	11.04.2019	23.05.2020	91 +/- 10	0 +/- 0	91 +/- 10
Laderas restauradas con otros parámetros (Z-Grande)	12.04.2019	24.05.2020	1,311 +/- 156 <sup>1</sup>	210 +/- 48	NA <sup>2</sup>
Talud convencional (Z-Grande)	12.04.2019	24.05.2020	617 +/- 54 <sup>1</sup>	472 +/- 53	NA <sup>2</sup>

1. Estos valores con aportes tan altos se deben en gran medida al efecto de vegetación.

2. No se aplica debido al alto efecto de la vegetación sobre los datos de aporte de material.

## 6. Discusión

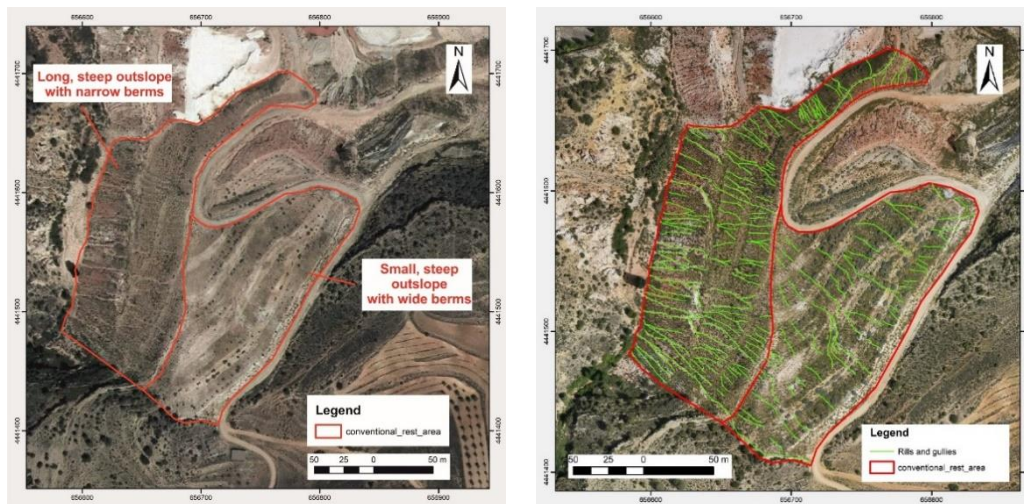
### 6.1. Formas erosivas, caudales restaurados y cobertura vegetal

Observar la evolución de las formas erosivas una vez realizada la restauración es de suma importancia para analizar la viabilidad del ecosistema restaurado. En total, se digitalizaron 787 regueros en la mina Fortuna. En la Figura 12 se observa en Z-Pequeña apenas se han desarrollado regueros. La gran mayoría se han generado en Z-Grande, ya presenta ciertas características que la hacen más propicia a la aparición de formas erosivas:

1. Su dimensión es mayor, por lo que la probabilidad de que aparezcan regueros y cárcavas en este territorio es más alta (Cermeño, 2017).
2. La sección está compuesta por una mayor variabilidad de accidentes geográficos. Entre estos, se encuentran los taludes convencionales, formas más propicias a ser erosionadas (Nicolau, 2003b).
3. En la salida de campo, se observó que algunas microcuencas procedentes de la revegetación pudieron influir en la creación de formas erosivas. El grupo de la Universidad de Alicante, participante en el Proyecto Life TECMINE, se encuentra analizando este fenómeno.

4. La topografía GeoFluv™ canónica sólo pudo construirse en una parte del área restaurada. La Tabla 2 y la Figura 13 revelan que la gran mayoría de formas erosivas se localizan en la demarcación “No GeoFluv”, sector que no aparece en Z-Pequeña. Se trataba de una antigua escombrera convencional pegada a un barranco, sin espacio para suavizar sus formas, por lo que se diseñó una topografía con un canal principal en zigzag y canales tributarios laterales separados por divisorias. Esta topografía, más abrupta de lo deseable, incrementó su erosividad. La utilización de diferentes parámetros en la construcción de las formas paisajísticas ha podido contribuir a un mayor desarrollo de formas erosivas, ya que la respuesta de la restauración depende de las características de zona de estudio (Bugosh y Epp, 2019). Se trata de un ejemplo de la necesaria adaptación de la restauración geomorfológica en escenarios de canteras en estado avanzado de explotación/restauración, donde ya existen escombreras o frentes con topografía convencional.

La aparición de formas erosivas en la zona “No GeoFluv” se puede resumir en los siguientes procesos. Por un lado, la tormenta Gloria (2019) produjo el encajamiento del canal principal. Por otro, se formaron numerosos regueros en las laderas de las cuencas laterales, que tienen un doble origen: a) por escorrentía generada en las propias laderas; b) por escorrentía procedente de las cuencas laterales superiores que no la evacuaron adecuadamente hacia el canal principal. Para establecer una solución idónea habrá que continuar con su monitoreo en los próximos años. No obstante, su comparación con la alternativa convencional de talud-berma construida aguas arriba (Figura 32) apunta hacia un mejor comportamiento desde el punto de vista erosivo.



**Figura 32. Modelo de restauración convencional alternativa al “No GeoFluv”. A la derecha, la cartografía de la red de regueros (Martín-Moreno et al 2018).**

En cuanto a los regueros que contienen una profundidad mayor a 2 cm, en general se localizan en zonas deprimidas (vaguadas). La formación de éstos es un proceso natural, pero, en algunos casos, son necesarios la vigilancia y seguimiento de ciertas formas erosivas. Es el caso del reguero localizado en la zona baja del Canal derecho “GeoFluv” (Figura 24). Esta forma erosiva contiene un promedio de pérdida de suelo parecido al canal “No GeoFluv”, pero con una longitud de apenas tres metros. Su formación puede ser debida a que se encuentra en una zona de suelo desnudo, en una vaguada y en una ladera con perfil rectilíneo (Nicolau et al., 2011; Nicolau, 2003a).

Además de la formación de regueros, se ha analizado el encajamiento de la red de drenaje construida en los cauces fluviales (canales). Uno de los principios de los diseños GeoFluv™ es que el nivel de base de la red de drenaje ha de coincidir con la cota del canal natural en el punto de vertido. Es decir, si el canal GeoFluv™ que conecta con el canal natural, lo hace a una cota superior a la de éste, experimentará un proceso de encajamiento remontante que progresará hasta que el conjunto de la red alcance la pendiente de equilibrio (Zapico et al., 2018).

En general se aprecia un encajamiento por erosión remontante en casi todos los cauces analizados, siendo más activa en el canal “No GeoFluv” de Z-Grande, en el que se ha registrado un encajamiento máximo de 1,58 m (Figura 17). Es previsible que el proceso erosivo en este canal continúe en los próximos años.

También es apreciable el encajamiento de los cauces en Z-Pequeña, tanto en el “Canal central” como en el “Canal derecho”, tributario del anterior (con un encajamiento de 0,53 m y 0,78 m respectivamente). Esta red de drenaje desemboca en una balsa de retención de sedimentos que se encontraba a una cota inferior a la del cauce creado por GeoFluv™, lo que propició el proceso de erosión remontante. Sin embargo, si dicha balsa colmata, es posible que se frene el avance de la erosión.

El “Canal GeoFluv” de Z-Grande ha sufrido una acumulación de sedimentos en su recorrido. Debido a que este canal contiene una elevada frondosidad de vegetación a su alrededor, es posible que haya fallos en el MDE generado en 2020 (Wheaton et al., 2010). Ello pone de manifiesto las limitaciones del método para evaluar tanto la formación de regueros como el encajamiento de la red de drenaje cuando hay un desarrollo de la vegetación, ya que afecta a la precisión del MDE. Por ello, en las próximas semanas, este trabajo se va a complementar con una medición en campo de las formas erosivas.

### Cobertura vegetal

Según Nicolau et al., en 2011, la trayectoria de la estabilización de una ladera puede intuirse por la densidad media de los regueros formados en dicha superficie y el porcentaje de cubierta vegetal que contenga el territorio. Así pues, según los valores que se obtengan, la hidrología del lugar puede estar supeditada al control biótico o al abiótico.

En la mina Fortuna, en ninguna de las parcelas observadas se supera una densidad de longitud de los regueros mayor o igual de 0,60 m/m<sup>2</sup>. Además, los valores de cobertura vegetal son altos, superando el 50%. Este hecho indica que, en general, el territorio cumple con las condiciones descritas en Nicolau et al., 2011 para que la restauración de la mina esté sometida al control de factores bióticos (Nicolau et al., 2011; Moreno de las Heras et al., 2009).

### 6.2. Efecto erosivo de los diferentes factores

Parcelar la mina Fortuna según los distintos factores que afectan a la consolidación del ecosistema y comparar, dentro de cada superficie, la densidad de regueros, proporciona una idea básica sobre la estabilización de la topografía, y, como consecuencia, del desarrollo futuro de la sucesión ecológica (Nicolau et al., 2011).



Si se analizan los resultados anteriores, se pueden extraer diferentes conclusiones sobre el efecto que generan los distintos factores en la formación de regueros y cárcavas.

### Lomas y vaguadas

La implementación de laderas en un territorio mejora el desarrollo de la red de drenaje en el paisaje restaurado. Para ello, es imprescindible establecer divisorias (lomas) y concavidades (vaguadas) por todo el territorio, ocasionando que el agua fluya más rápidamente hacia los canales principales sin encontrar una gran oposición por la topografía. En general, la precipitación circula por las zonas más deprimidas del terreno, es decir, por las vaguadas (Cermeño, 2017). En el caso de la mina Fortuna, los datos recogidos nos indican que este método es eficaz. Sin embargo, estadísticamente, los resultados no son significativos (Tabla 10). Es posible que haya otros factores, como el porcentaje de vegetación o el cambio topográfico en los perfiles longitudinales, que favorezcan la formación de regueros en las lomas.

### Suelo utilizado en la restauración

El tipo de suelo utilizado en la restauración influye en la estabilidad del terreno (Cermeño, 2017). En el caso de estudio, la tolerancia que contiene el coluvión de piedra caliza a ser erosionado es menor que el estéril de la mina debido a su estructura.

En los resultados obtenidos, se observa una gran diferencia entre un material y otro en Z-Grande, presentando, en el caso del estéril, una densidad media  $0,25 \text{ m/m}^2$  de regueros. Esto no se manifiesta en la sección Z-Pequeña. La carencia de regueros en Z-Pequeña indica que la combinación de topografía GeoFluv™ canónica con sustrato de coluvión disminuye notablemente la generación de formas erosivas. Además, en esta sección, gran parte del estéril se encuentra cubierto por más de un 30% de vegetación y con una ladera sigmoidal (convexas). Por el contrario, en Z-Grande, el porcentaje de vegetación es menor y el estéril se localiza entre laderas rectilíneas y sigmoidales, provocando un aumento en número de regueros.

### Inclinación de la pendiente

El grado de inclinación de una superficie es otro agente destacado en la formación de regueros y cárcavas. Kou et al., en 2020, realizan un estudio sobre la influencia de la pendiente en la erosión del suelo en un área de loess. Dado que la zona de estudio puede asemejarse a este tipo de territorio (ya que el suelo y geología que presenta la

mina es similar), se utilizaron los mismos criterios para analizar esta cantera. Los resultados de este trabajo son similares a los recogidos por estos autores. En general, se observa que, en Z-Grande, la mayor densidad de regueros se localiza entre las pendientes de 10° a 20° y de 20° a 45°. Este hecho puede explicarse debido a que en las pendientes menores de 10°, la fuerza de arrastre que contiene el agua no es tan grande como la resistencia que posee el suelo. Por otro lado, en laderas con una pendiente mayor a 45°, la acumulación de precipitación no es suficiente para crear formas erosivas (Cermeño, 2017). De todas maneras, la pendiente es un factor específico de cada territorio y no se pueden extrapolar estos datos a una zona con características diferentes (Kou et al., 2020).

### Perfil longitudinal de las laderas

Dentro del método GeoFluv™ se considera que las laderas más estables son aquellas que contienen un perfil sigmoidal (Nicolau, 2003a), debido a que en éstas la vegetación obtiene un mayor éxito en su implantación (Martín-Moreno et al., 2016). Aunque las dos secciones han sido restauradas siguiendo este parámetro, la transformación de sus perfiles han evolucionado hacia diferentes escenarios. Los resultados obtenidos indican que la densidad de regueros es mucho mayor en perfiles cóncavos (Tabla 14, Figura 30). Sin embargo, los datos estadísticos no son significativos en su conjunto (Tabla 17), pero si se observa una diferencia significativa entre los perfiles rectilíneos y cóncavos frente a los convexos.

### 6.3. Estimación de la tasa de erosión anual

Debido a la dificultad de medir este parámetro según la metodología seleccionada, sólo se tendrán en cuenta los resultados de volumen de aporte para la balsa de sedimentos de Z-Pequeña. En ella se observa un valor de 91 +/- 10 m<sup>3</sup>, lo que se traduce en 58 +/- 6 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Este dato es mucho mayor del aportado en Nicolau et al., 2011, donde la cantidad de sedimento máxima anual que puede perder un territorio es de 17 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

La pérdida de suelo en la mina Fortuna es similar al descrito por Zapico et al., 2018 para la mina El Machorro. Al igual que en ese caso, la erosión se localiza en los canales restaurados, pero es posible que una parte del valor total provenga de la erosión laminar y del aporte de sedimentos de zonas externas a la restauración geomorfológica como los taludes que la rodean.

Al igual que sucedió en la mina El Machorro, esta alta tasa de erosión es normal en los primeros años de construcción, ya que el territorio debe ajustarse, con lo que es de suponer que este valor descenderá de manera exponencial a lo largo de los años (Zapico et al., 2018). Por eso, es conveniente hacer una balsa de sedimentación durante el primer año posterior a la restauración no sólo para estudiar la estabilidad del terreno, sino también para retener este sedimento, que se produce por reajustes normales en cualquier obra que implica movimiento de tierras, y evitar que se vierta aguas abajo.

Además, en la Tabla 17 se observa que las tasas de erosión en las “Laderas restauradas con otros parámetros” y en el “Talud convencional” en Z-Grande son muy altas si se comparan con los datos aportados en Nicolau et al., 2011. Esto lleva a pensar que las tasas de erosión en esta sección superan con creces las tasas de erosión de Z-Pequeña.

## 7. Conclusión

El análisis del seguimiento de las formas erosivas desarrolladas en la mina Fortuna en sus primeros dos años, ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

- Las superficies GeoFluv™ canónicas (formas topográficas suaves con recubrimiento de coluvión) han desarrollado una densidad de regueros muy limitada.
- La sustitución del coluvión por sustrato de tipo estéril en estas superficies, implica un aumento notable de las formas erosivas (casi cuatro veces más).
- En los paisajes GeoFluv™, los regueros se desarrollan en mayor medida en las vaguadas y en los perfiles longitudinales rectilíneos o cóncavos.
- El rango de la pendiente donde se han formado más regueros oscila entre 25° - 40°.
- Las áreas donde no se ha podido aplicar el modelo GeoFluv™ canónico presentan la mayor abundancia de formas erosivas. Es el caso de la zona denominada “No GeoFluv” (solución topográfica basada en un canal central en “zigzag”) que se tuvo que adoptar en una zona de alto desnivel topográfico y reducida superficie.
- Los cauces construidos están experimentando un encajamiento por erosión remontante, que se reducirá cuando se alcance una situación de equilibrio con el nivel de base de la red de drenaje natural a la que vierten.

- El efecto de la revegetación ha podido acelerar la erosión. Las secciones que no fueron sembradas contienen regueros de grandes dimensiones y profundidades. Además, las microcuencas creadas para revegetar han podido desajustar la red de drenaje creada en el modelo GeoFluv™, introduciendo una mayor inestabilidad en el terreno.
- Las tasas de erosión registradas son elevadas, tal y como sucede en las restauraciones mineras en su primer año de construcción, con condiciones de suelo no consolidado y baja cobertura vegetal. Estas tasas disminuirán exponencialmente en los siguientes años conforme el suelo se asiente y la cubierta vegetal se expanda.
- La metodología utilizada para la realización de la cartografía de las formas erosivas a partir de ortofotos y MDE's tomadas con dron, resulta poco precisa cuando la vegetación presenta cierto desarrollo, por lo que se requiere de un estudio de campo complementario para una mejor evaluación de los procesos erosivos.
- Para futuras investigaciones, sería interesante incluir el estudio de este último factor como agente formador de erosión del suelo. Asimismo, también sería oportuno categorizar las formas erosivas según su comportamiento y trayectoria (es decir, si forman una red de regueros confinados o detríticos) para identificar con mayor acierto los factores que influyen en la creación de estos.
- La restauración de la mina Fortuna sigue una evolución favorable, pero es recomendable continuar con el seguimiento de la estabilidad del terreno y de la erosión en los próximos años para evaluar su éxito.

## 8. Agradecimientos

Esta memoria se enmarca dentro del *Proyecto LIFE TECMINE - Innovative techniques for Facies Weald and Utrillas mine Restoration (LIFE16 ENV/ES/000159)*. Quería dedicar un agradecimiento especial a mis directores, José Manuel Nicolau e Ignacio Zapico Alonso, por su dedicación y perseverancia en este trabajo. También, agradecerle a José Francisco Martín Duque, tutor de este TFM, por toda la información añadida y el apoyo ejercido.



Agradecerle también este trabajo a mi familia Mesías-García y a Fernando López Gómez, Jaime Casado Casanova, Manuel Más Gutiérrez y Sofía Aguinaga Mariño por el apoyo y cariño aportado a lo largo de este camino.

## 9. Bibliografía

- Agencia Estatal de Meteorología, 2020. *Visor del Atlas climático de la Península y Baleares*. Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. Gobierno de España. [Usado 10 noviembre 2020]. Disponible en: <http://agroclimap.aemet.es/>
- Bugosh, N., 2000. Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation. En: *OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop*, January 2000. Office of Surface Mining, Farmington, NM, Estados Unidos.
- Bugosh, N., Epp, E. 2019. Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphicreclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena* 174:383-398. doi:10.1016/j.catena.2018.10.048
- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Duncan, J.Q., 2016. *Structure From Motion in the Geosciences*. Wiley-Blackwell, UK.
- Cermeño, I. 2017. *Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta erosiva durante episodios extremos de erosión en paisajes agrícolas de secano mediterráneo*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Espigares, T., Moreno de las Heras, M., Nicolau, J.M. 2011. Performance of vegetation in reclaimed slopes affected by soil erosion. *Restoration Ecology* 17(1):35-44. doi: 10.1111/j.1526-100X.2009.00546.x
- González-Hidalgo, J.C., Batalla, R.J., Cerda, A., De Luis, M. 2012. A regional analysis of the effects of largest events on soil erosion. *Catena* 95:85-90. doi:10.1016/j.catena.2012.03.006
- González-Hidalgo, J.C., Peña-Monné, J. L., De Luis, M. 2007. A review of daily soil erosion in Western Mediterranean areas. *Catena* 71:193-199. doi:10.1016/j.catena.2007.03.005
- Hancock, G. R., Crawter, D., Fityus, S. G., Chandler, J., Wells, T. 2008. The measurement and modelling of rill erosion at angle of repose slopes in mine spoil. *Earth Surface Processes and Landforms* 33:1006-1020. doi:10.1002/esp.1585

- Hancock, G.R., Willgoose, G.R. 2016. Sustainable mine rehabilitation - 25 years of the SIBERIA landform evolution and long-term erosion model. En *From Start to Finish: A Life of Mine Perspective*, 371- 382. AusIMM.
- Köppen, W. 1918. Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag und jahreslauf. *Petermanns Mitt.* 64:193-203.
- Kou, P., Xu, Q., Yunus, A. P., Dong, X., Pu, C., Zhang, X., Jin, Z. 2020. Micro-topographic assessment of rill morphology highlights the shortcomings of current protective measures in loess landscapes. *The Science of the Total Environment* 737:139721. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139721
- Martin Duque, JF, Tejedor, M, Martin-Moreno, C, Nicolau, JM, Zapico, I 2019. Geomorphic rehabilitation in Europe: recognition as best available technology and its role in LIFE projects. En: Fourie, A.B., Tibbett, M. (eds), *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, pp. 133-146. doi:10.36487/ACG\_rep/1915\_12\_Duque
- Martín-Duque, J.F., Zapico I., Oyarzun R., López-García, J.A., Cubas P. 2015. A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain. *Geomorphology* 239:1-16. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.035
- Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J.F., Nicolau, J.M., Bladé, E., Tejedor, M., Nyssen, S., Lalaguna, M., De Lis, A., Cermeño-Martín, F.I., Gómez-Díaz, J.M. 2018. Restauración geomorfológica de dos arcilleras en Campredó (Tortosa, Tarragona). Una solución a los efectos del cambio global. En: García, C., Gómez-Pujol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla, R.J. (eds), *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos*, pp. 365-368. Universitat de les Illes Balears, Sociedad Española de Geomorfología, Palma.
- Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J.F., Nicolau-Ibarra, J.M., Muñoz-Martín, A., Zapico, I. 2018. Waste dump erosional landform stability - a critical issue for mountain mining. *Earth Surface Processes And Landforms* 43:1431-1450. doi:10.1002/esp.4327
- Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J.F., Nicolau-Ibarra, J.M., Rodríguez, N. H., Sanz-Santos, M. A., Sánchez-Castillo, L. 2016. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro mine (central Spain). *Land Degradation & Development* 27:145-159. doi:10.1002/ldr.2232

- Merino-Martín, L., Moreno de las Heras, M., Espigares, T., Nicolau, J.M. 2015. Overland flow directs soil moisture and ecosystem processes at patch scale in Mediterranean restored hillslopes. *Catena* 133:71-84. doi:10.1016/j.catena.2015.05.002
- Merino-Martín, L., Moreno de las Heras, M., Pérez-Domingo, S., Espigares, T., Nicolau, J.M. 2012. Hydrological heterogeneity in Mediterranean reclaimed slopes: runoff and sediment yield at the patch and slope scales along a gradient of overland flow. *Hydrology and Earth System Sciences* 16:1305–1320. doi:10.5194/hess-16-1305-2012
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) 2011. Caracterización Agroclimática. España: Servicio WMS (*Web Map Service*). Recuperado de: <https://www.mapama.gob.es/ide/metadatos/srv/spa/metadata.show?uuid=b72a61da-ebba-4892-9883-17f0cd76026b>
- Moreno de las Heras, M., Espigares, T., Merino-Martín, L., Nicolau, J.M. 2011. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Catena* 84:114-124. doi:10.1016/j.catena.2010.10.010
- Moreno de las Heras, M., Merino-Martín, L., Nicolau, J.M. 2009. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena* 77: 39-47. doi:10.1016/j.catena.2008.12.005
- Nicolau, J.M. 2002. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean-continental environment: the Teruel coalfield, Spain. *Hydrological Processes* 16: 631-647. doi:10.1002/hyp.308
- Nicolau, J.M. 2003a. Diseño y construcción del relieve en la restauración de ecosistemas degradados: una perspectiva ecológica. En: Rey, J.M., Espigares, T., Nicolau, J.M. (eds), *Restauración de ecosistemas mediterráneos*. pp 173-188. Colección Aula Abierta, España.
- Nicolau, J.M. 2003b. Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation & Development* 14:215-226. doi:10.1002/ldr.548
- Nicolau, J.M., Espigares, T., Moreno de las Heras, M., Merino-Martín, L. 2011. Ecohidrología: erosión hídrica y dinámica de la vegetación en laderas artificiales. En: Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., Alfaya, V. (eds), *Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas*. pp 75-84. Fundación Biodiversidad, Madrid, España.
- Proyecto Life TECMINE, 2020. Material de documentación.



- Rohrer, Z. 2015. *Mejora de hábitats para avifauna rupícola en canteras: ¿creando hábitats fuente o trampas ecológicas?* Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario de Restauración de Ecosistemas, Universidad de Alcalá, España.
- Rosgen, D.L. 1994. A classification of natural rivers. *Catena*, 22: 169-199. doi:10.1016/0341-8162(94)90001-9
- Toy, T.J., Chuse, W.R. 2005. Topographic reconstruction: a geomorphic approach. *Ecological Engineering*, 24: 29-35. doi:10.1016/j.ecoleng.2004.12.014
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., Sear, D. A. 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(2): 136-156. doi:10.1002/esp.1886
- Zapico, I., Martín-Duque, J. F., Bugosh, N., Laronne, J. B., Ortega, A., Molina, A.,... Sánchez-Castillo, L. 2018. Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The alto Tajo natural park, Spain. *Ecological Engineering* 111:100-116. doi:10.1016/j.ecoleng.2017.11.011

## 10. Anexos





Universidad  
Complutense  
Madrid

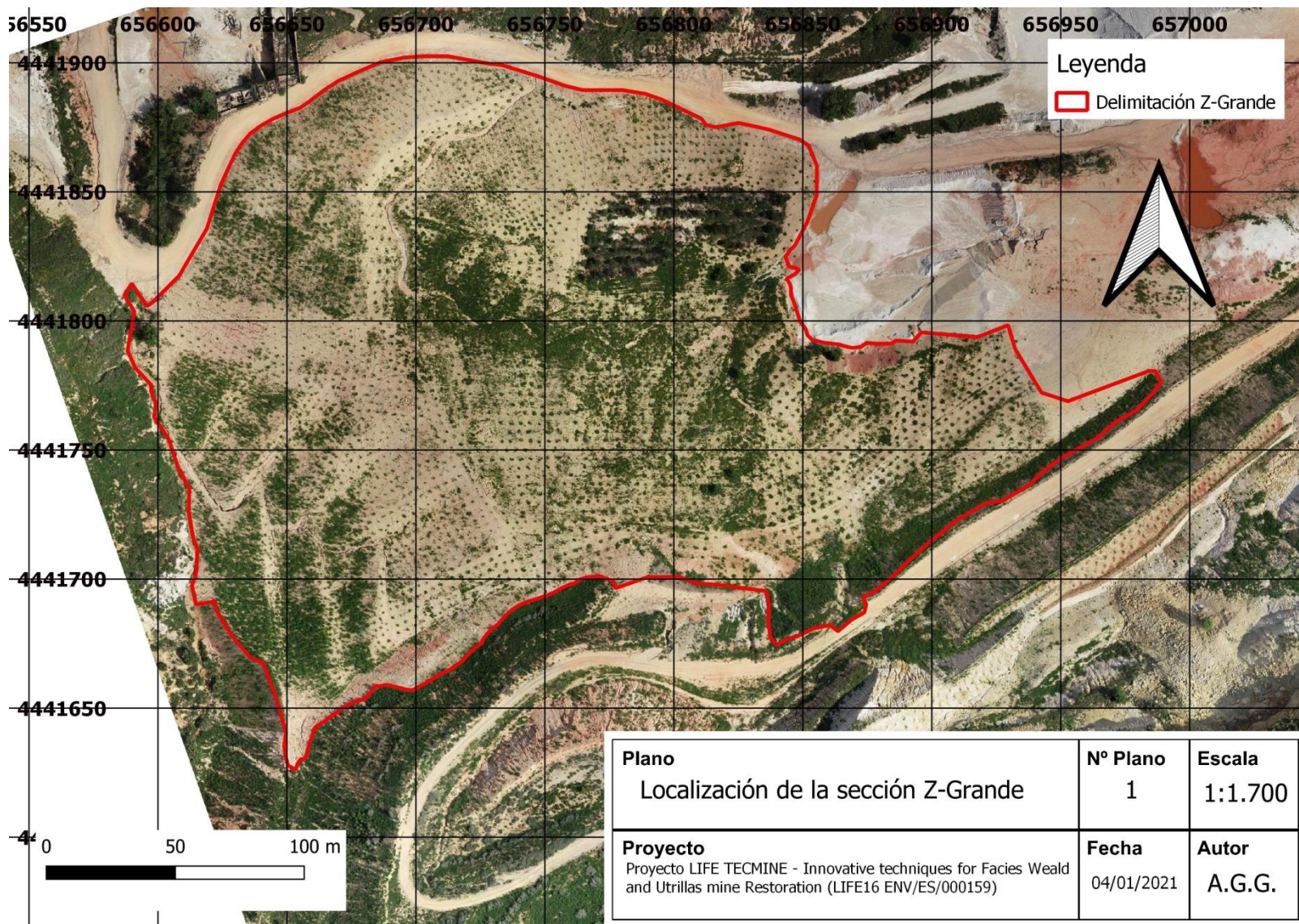


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 1. Plano de localización de la sección Z-Grande





Universidad  
Complutense  
Madrid



Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 2. Plano de localización de la sección Z-Pequeña









Universidad  
Complutense  
Madrid

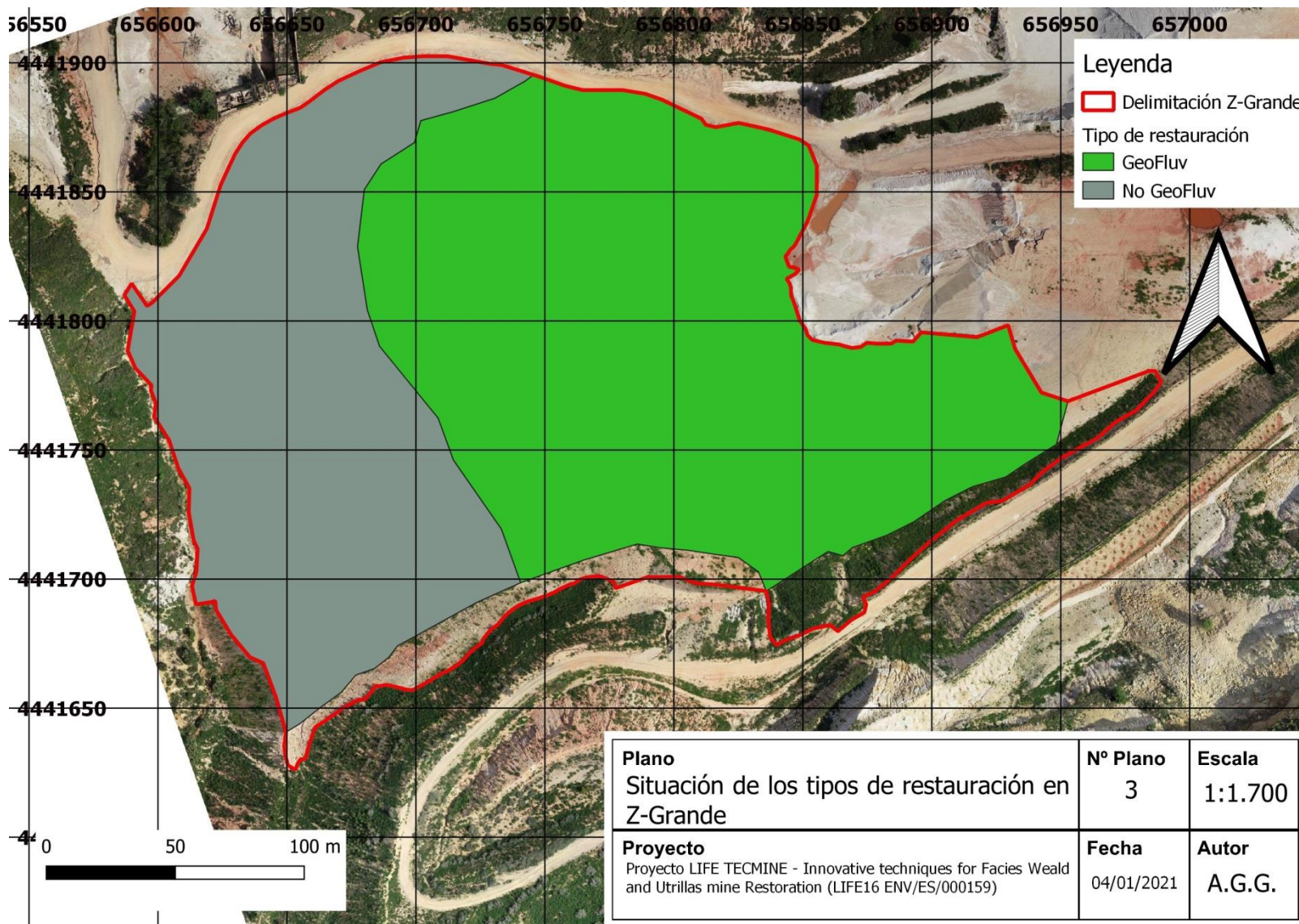


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

### Anexo 3. Plano de situación de los tipos de restauración geomorfológica en Z-Grande





Universidad  
Complutense  
Madrid



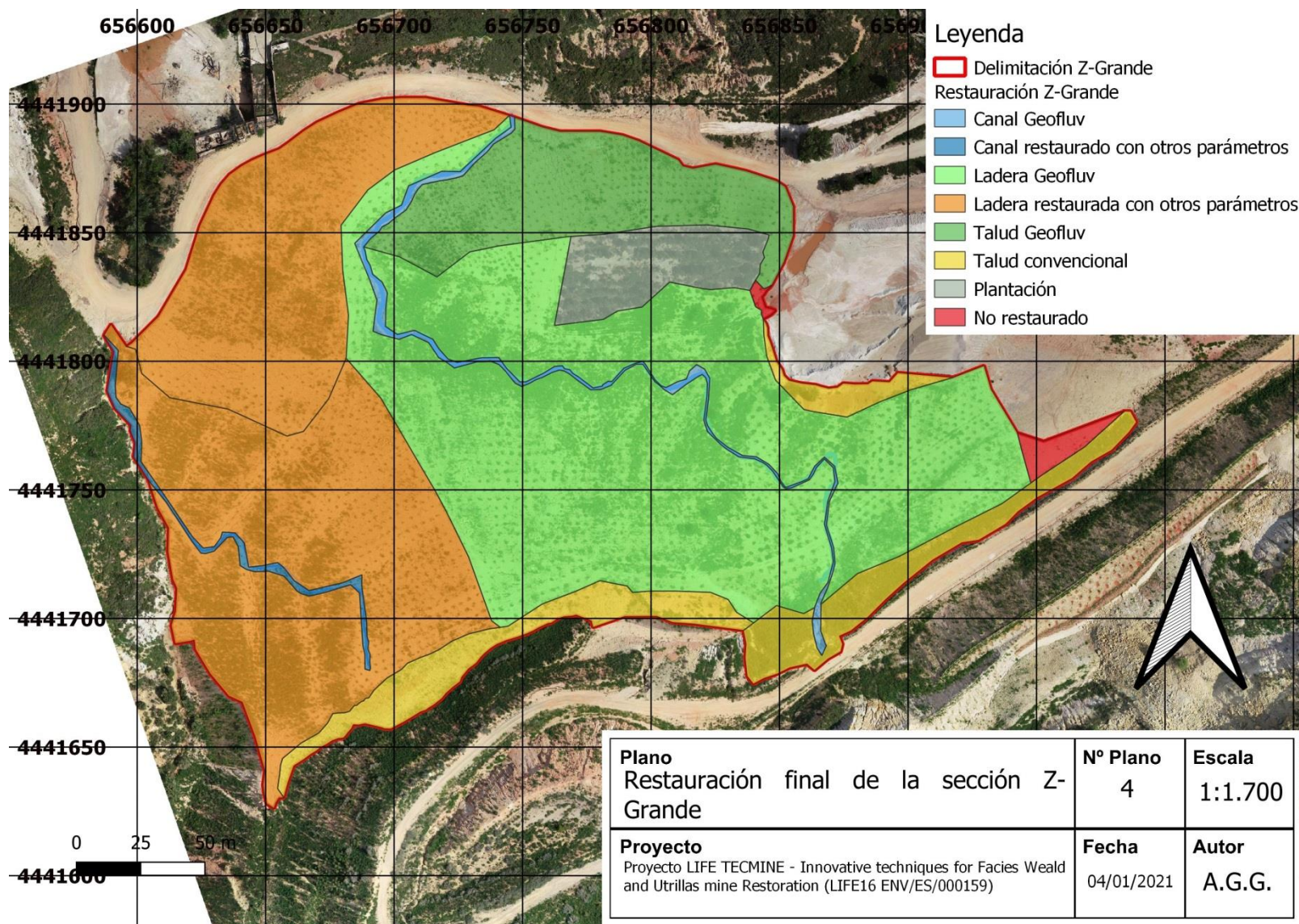
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

#### Anexo 4. Restauración final de la sección Z-Grande









Universidad  
Complutense  
Madrid

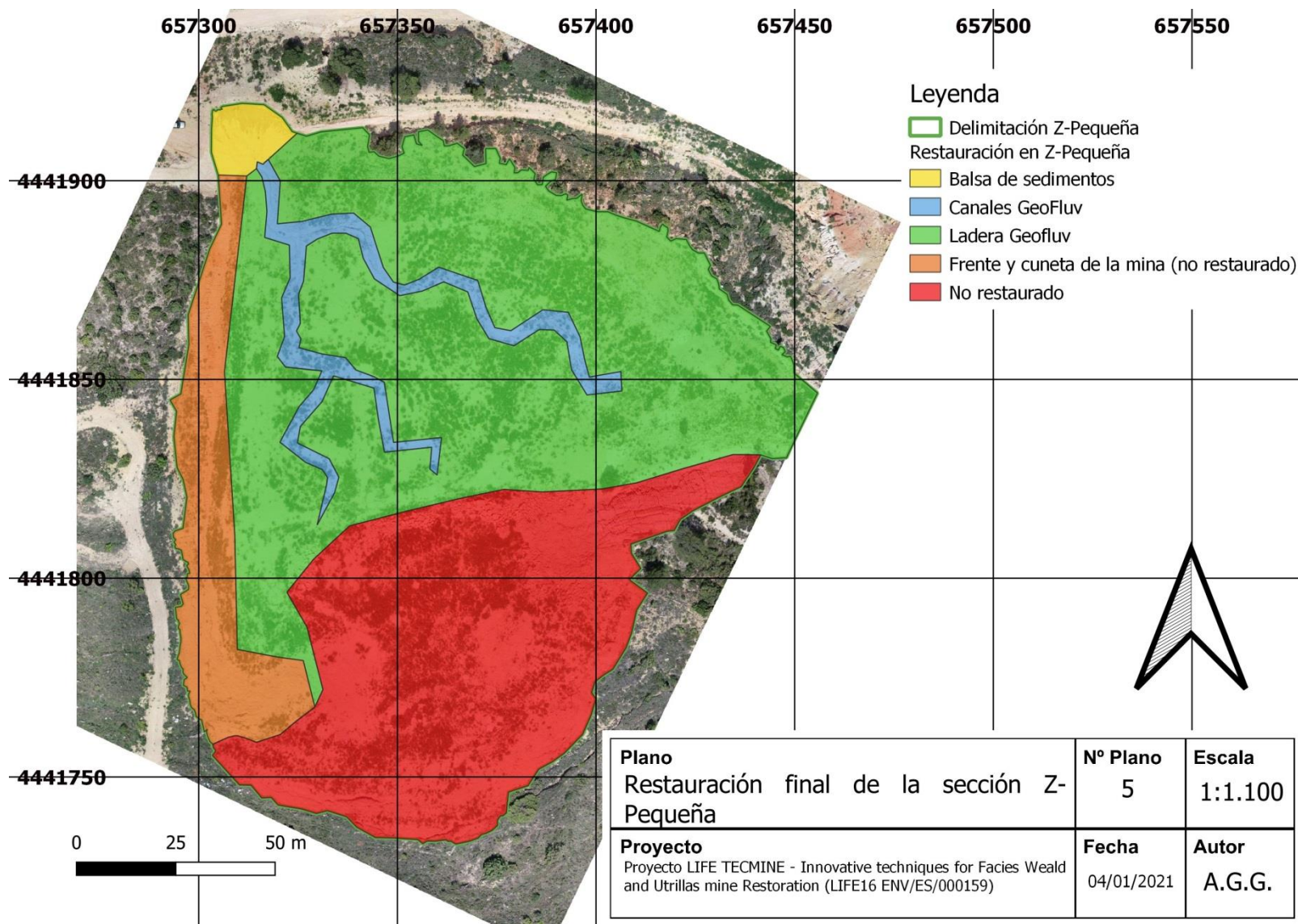


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 5. Restauración final de la sección Z-Pequeña





Universidad  
Complutense  
Madrid



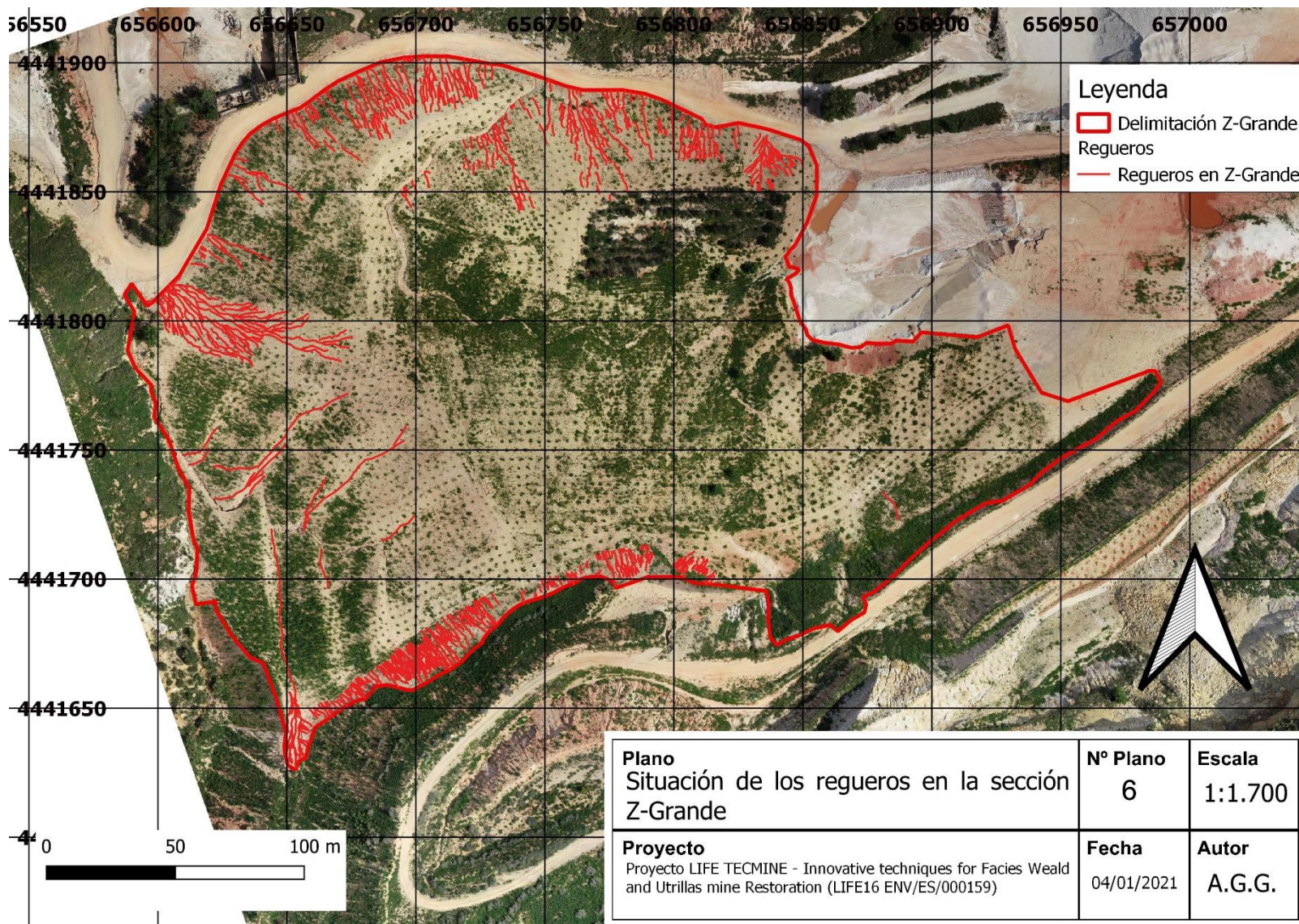
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 6. Plano de situación de los regueros en la sección Z-Grande









Universidad  
Complutense  
Madrid

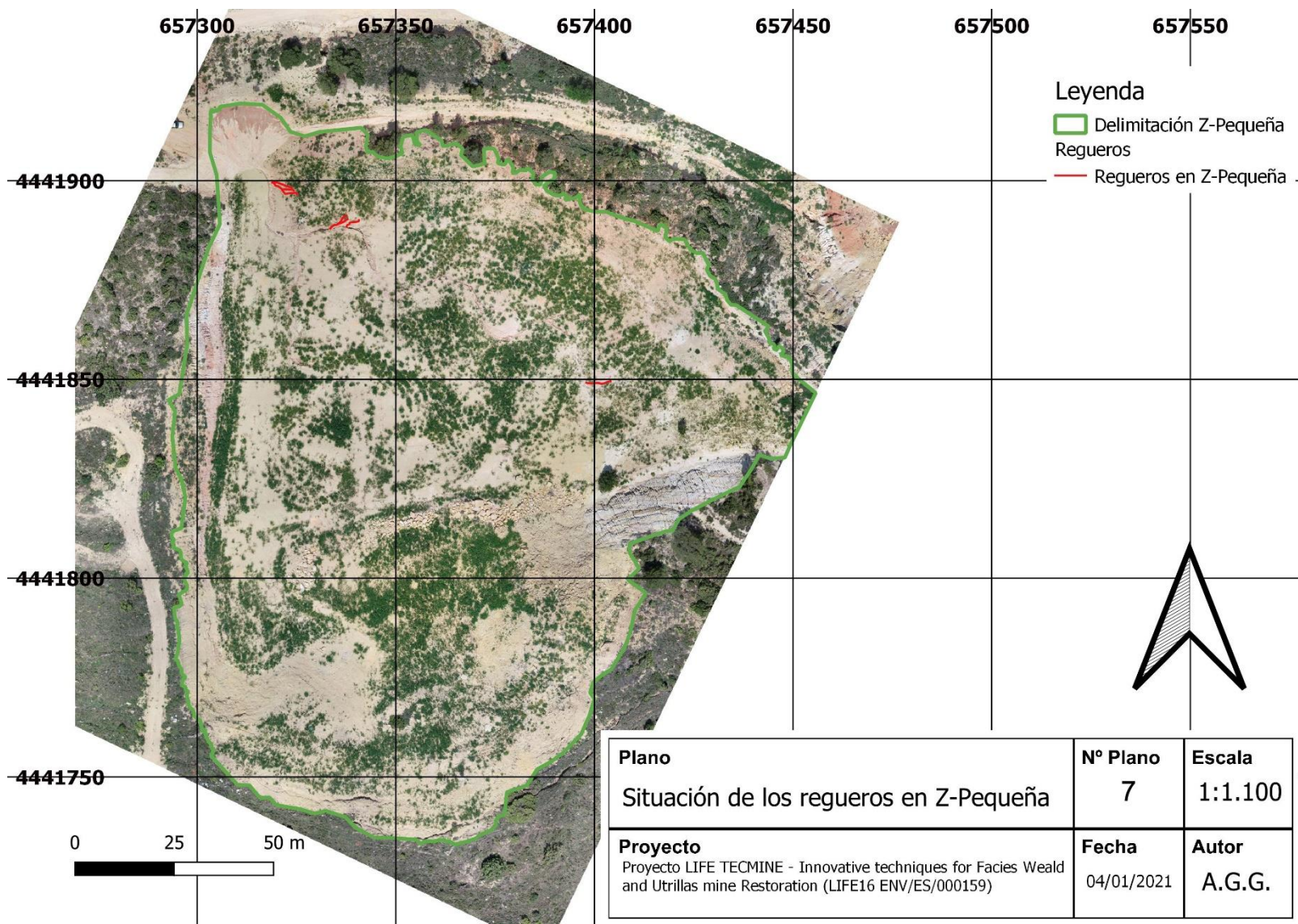


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 7. Plano de situación de los regueros en Z-Pequeña





Universidad  
Complutense  
Madrid



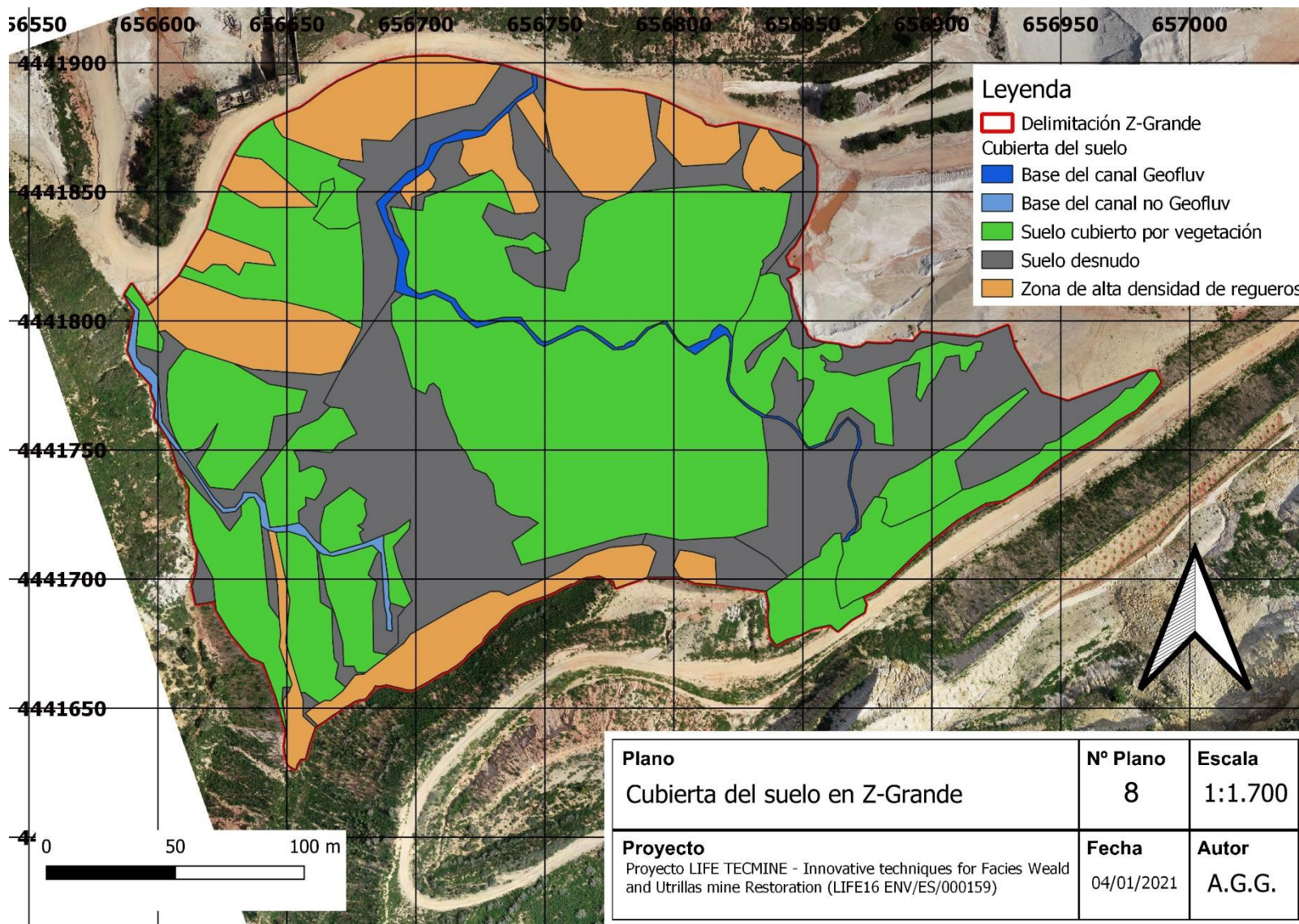
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 8. Plano de situación de la cubierta del suelo en Z-Grande









Universidad  
Complutense  
Madrid

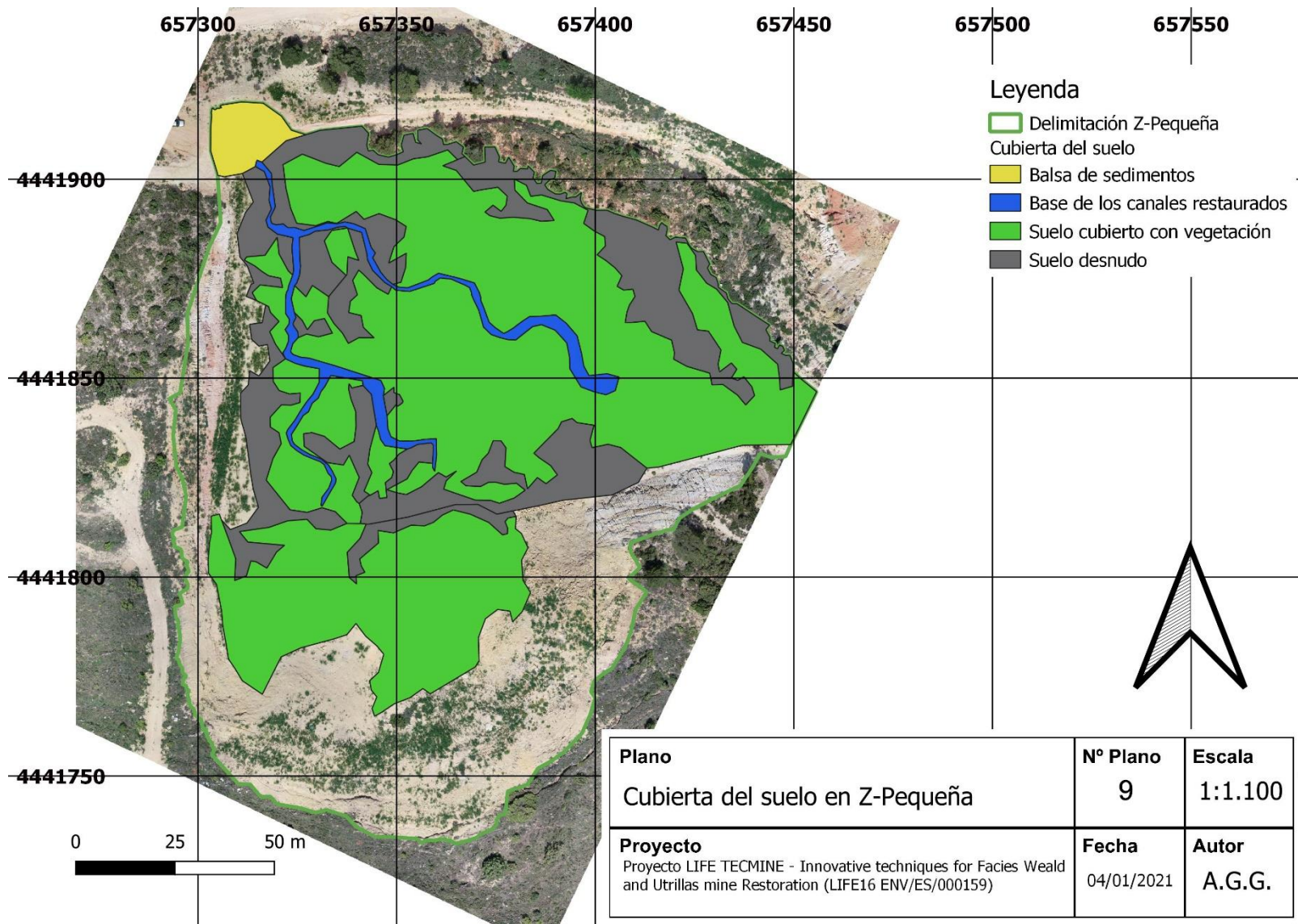


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 9. Plano de situación de la cubierta del suelo en Z-Pequeña





Universidad  
Complutense  
Madrid



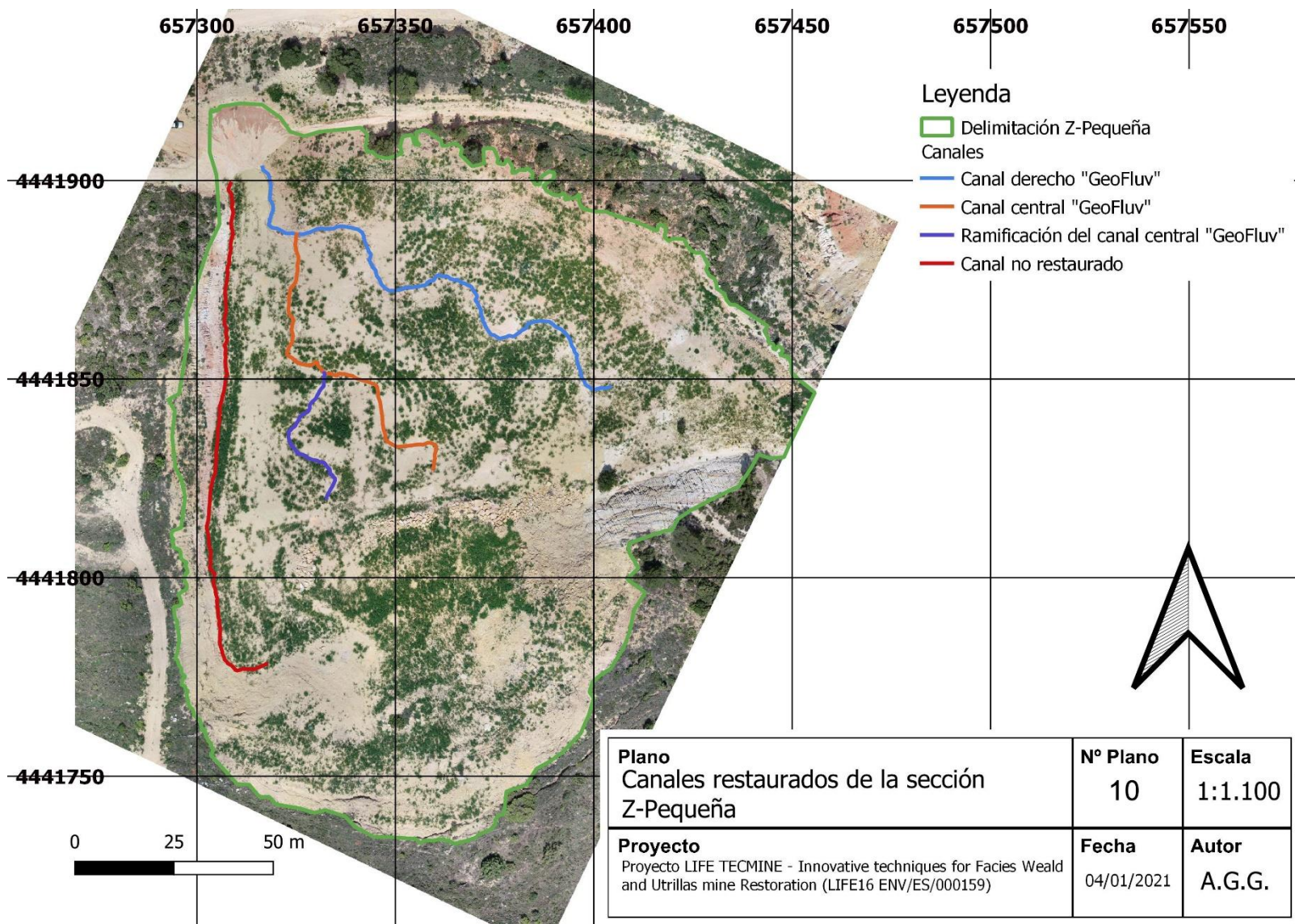
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 10. Plano de situación de los canales restaurados en la sección  
Z-Pequeña









Universidad  
Complutense  
Madrid

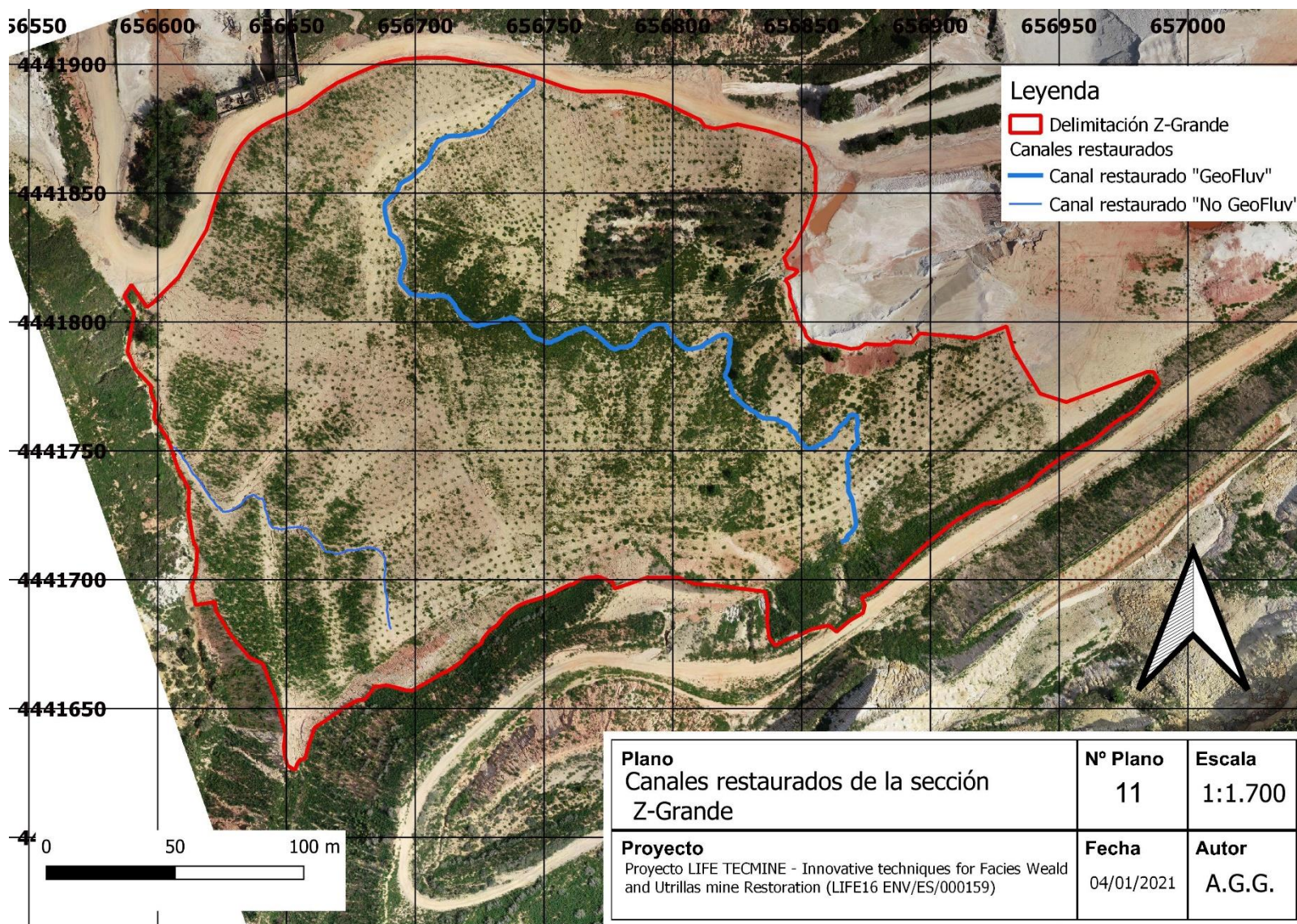


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 11. Plano de situación de los canales restaurados de la sección Z-Grande





Universidad  
Complutense  
Madrid



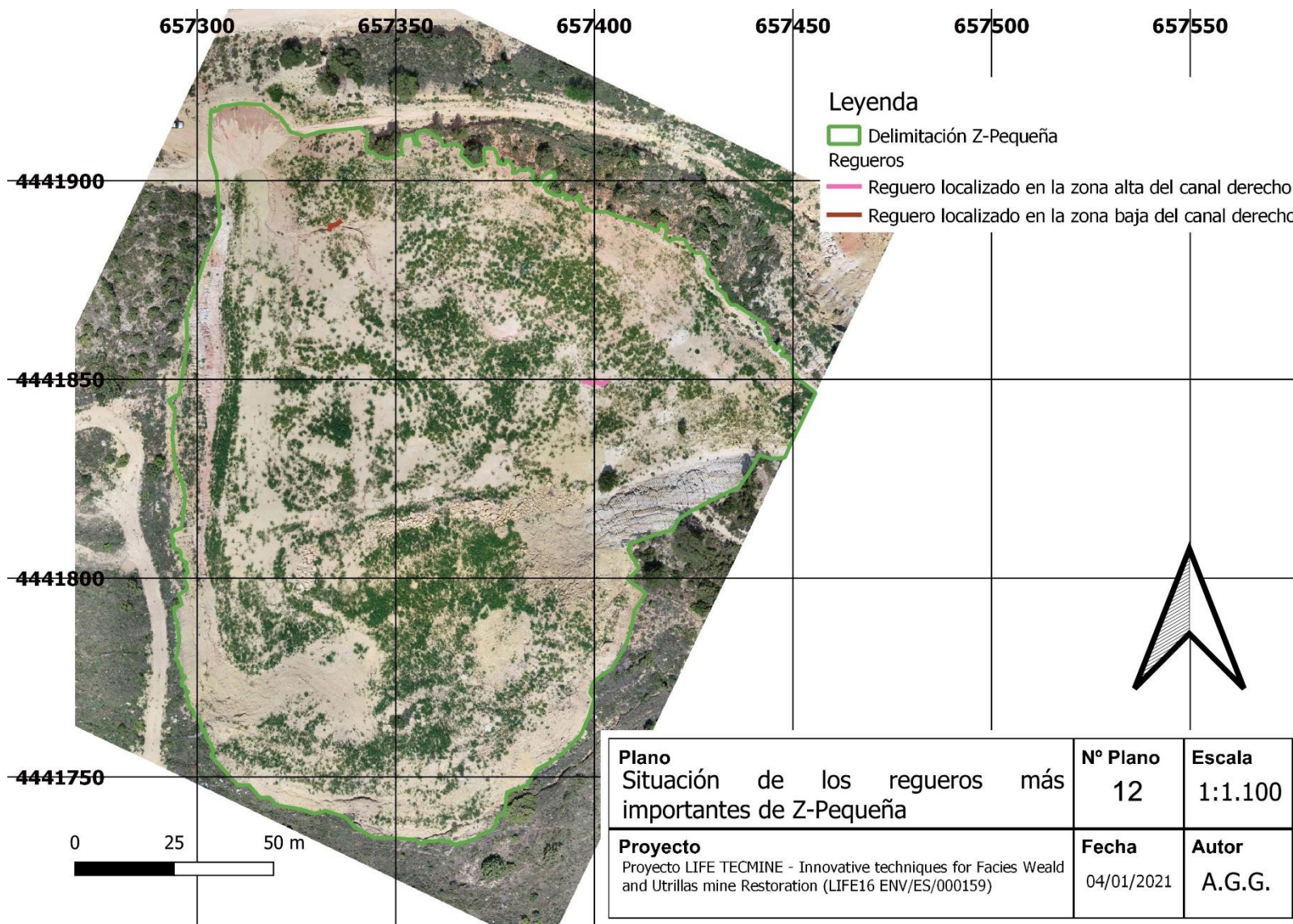
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 12. Plano de situación de los regueros más importantes de la sección Z-Pequeña









Universidad  
Complutense  
Madrid

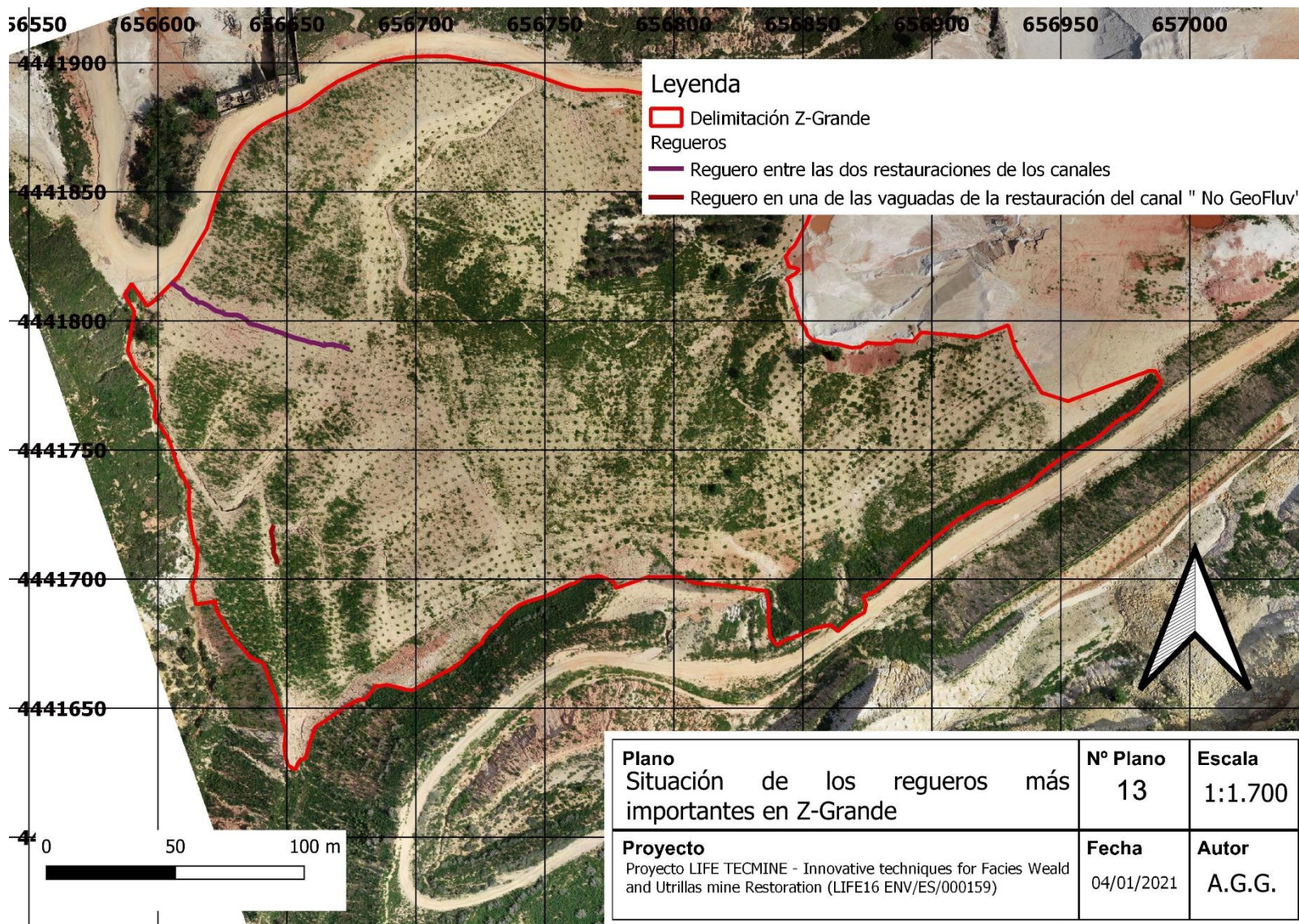


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 13. Plano de situación de los regueros más importantes de la sección  
Z-Grande





Universidad  
Complutense  
Madrid



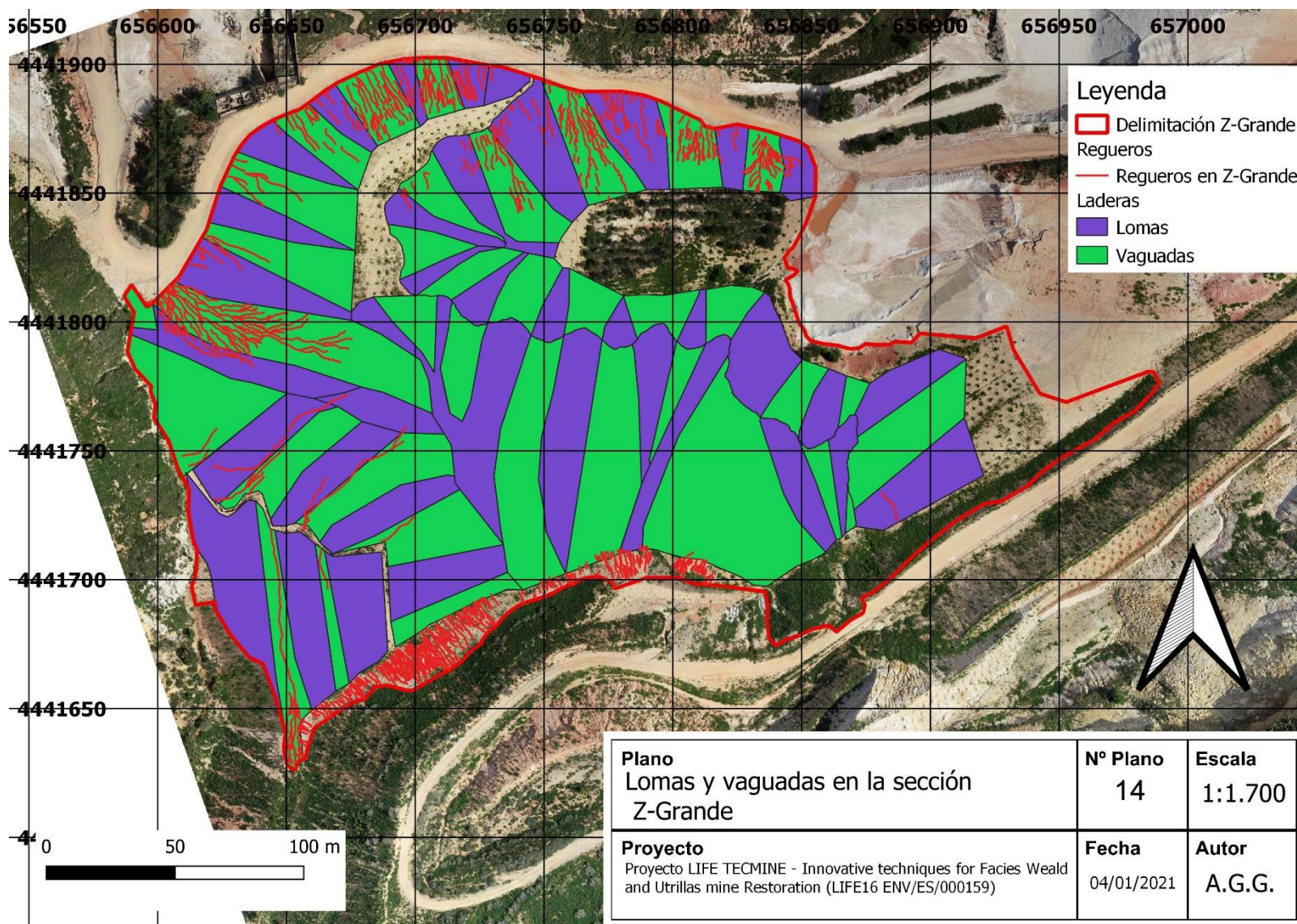
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

#### Anexo 14. Plano de situación de las lomas y vaguadas en la sección Z-Grande









Universidad  
Complutense  
Madrid

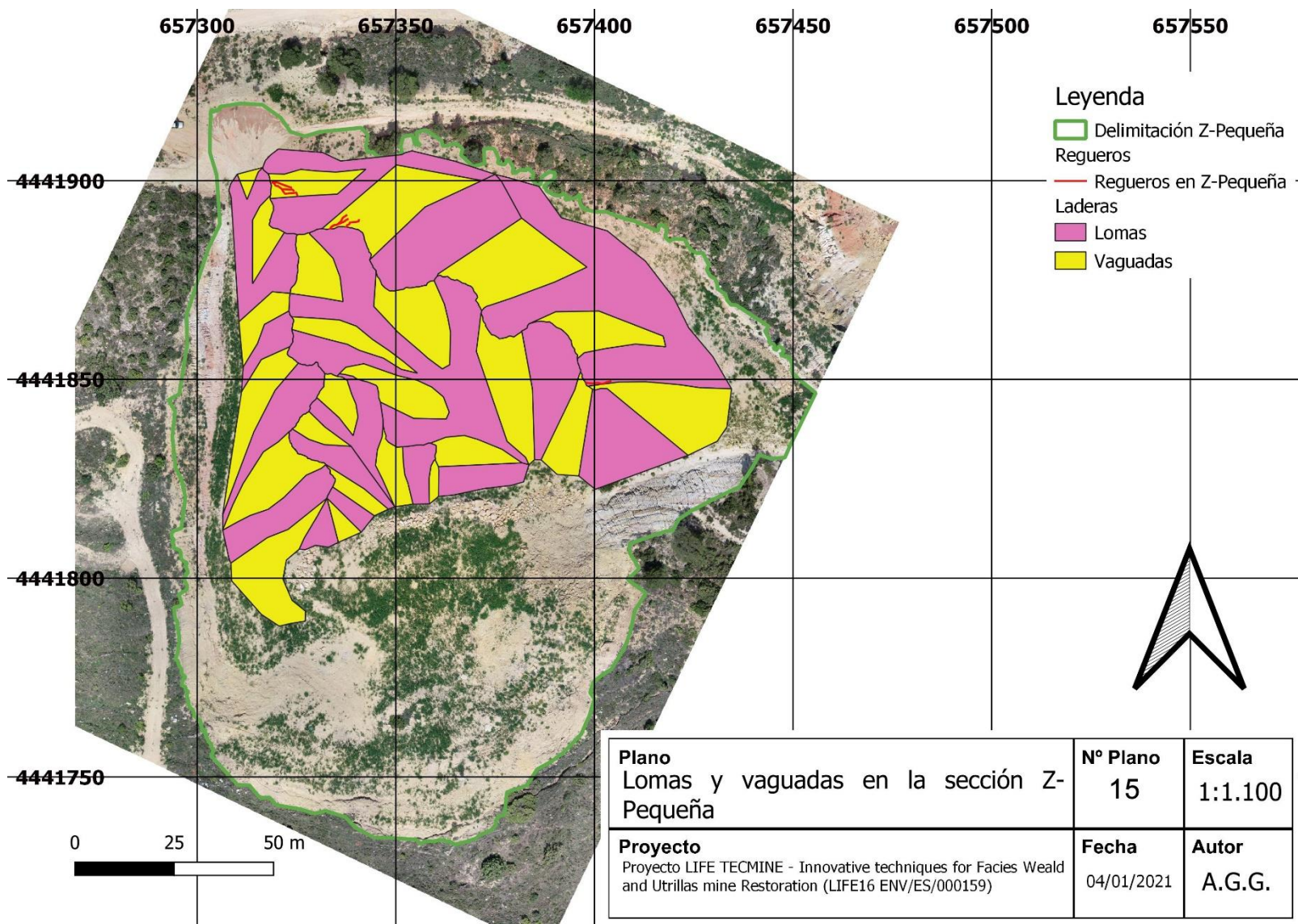


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 15. Plano de situación de las lomas y vaguadas en la sección  
Z-Pequeña





Universidad  
Complutense  
Madrid



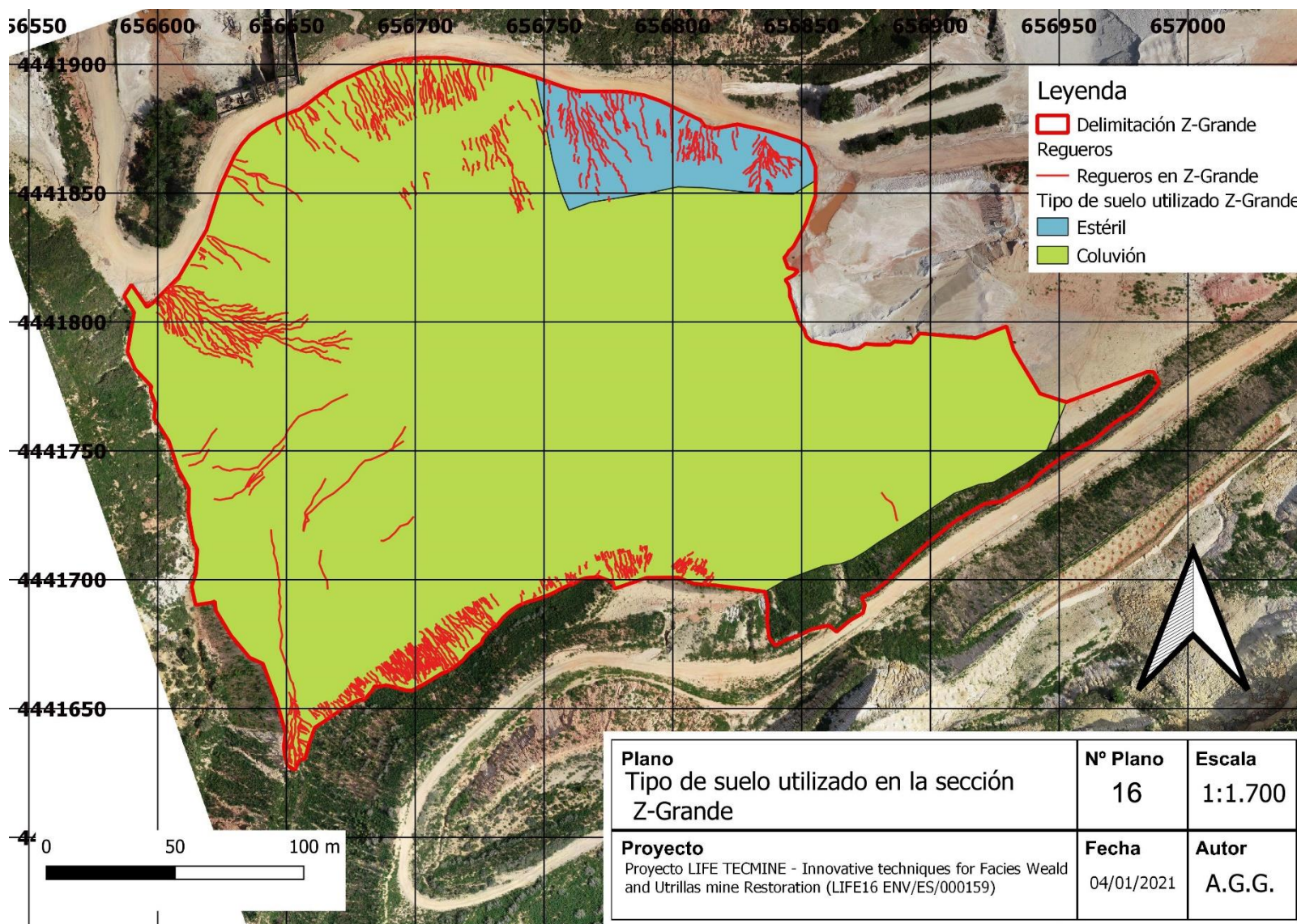
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 16. Plano de situación del tipo de suelo utilizado en la sección  
Z-Grande







Universidad  
Complutense  
Madrid



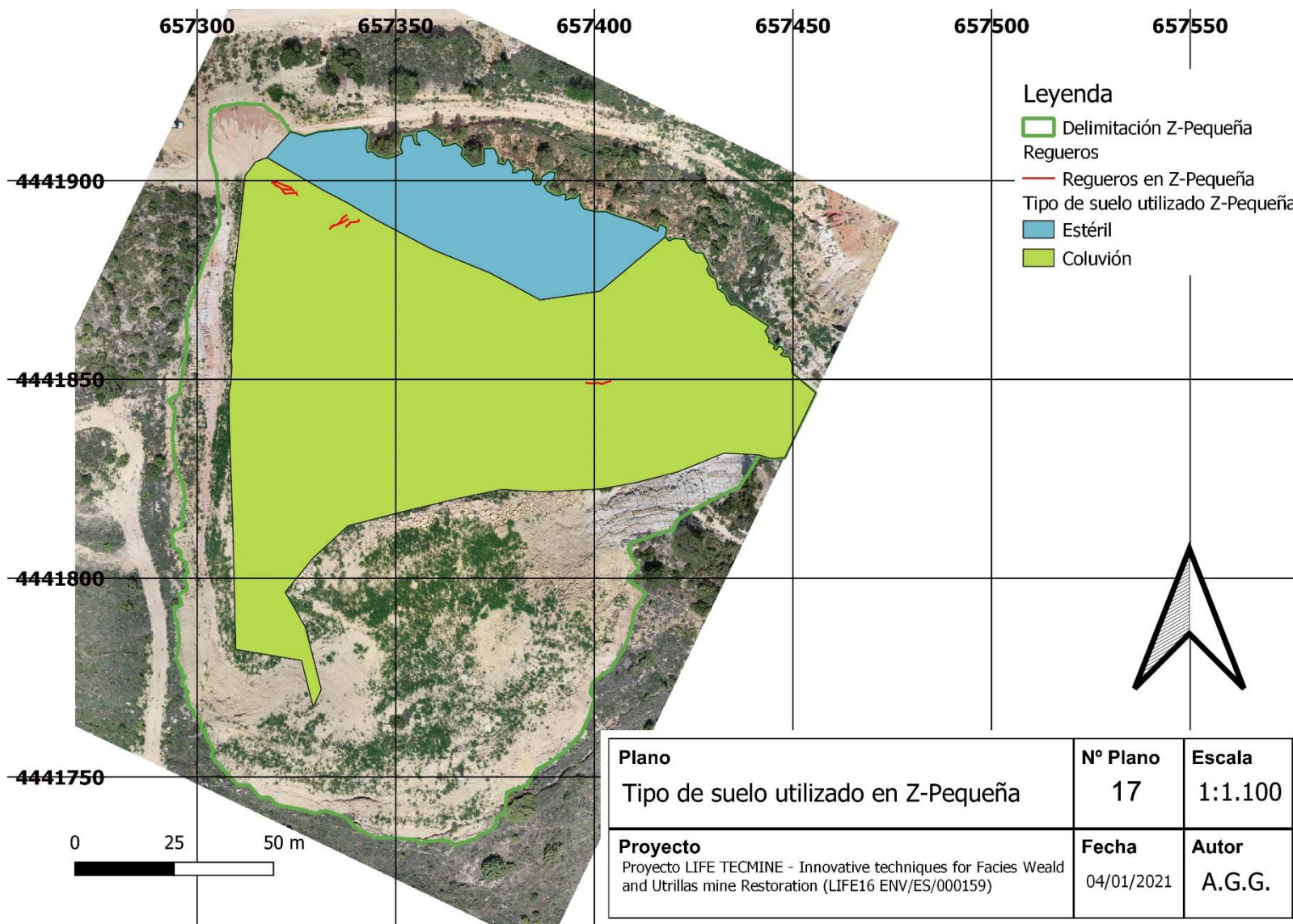
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 17. Plano de situación del tipo de suelo utilizado en la restauración de  
Z-Pequeña









Universidad  
Complutense  
Madrid

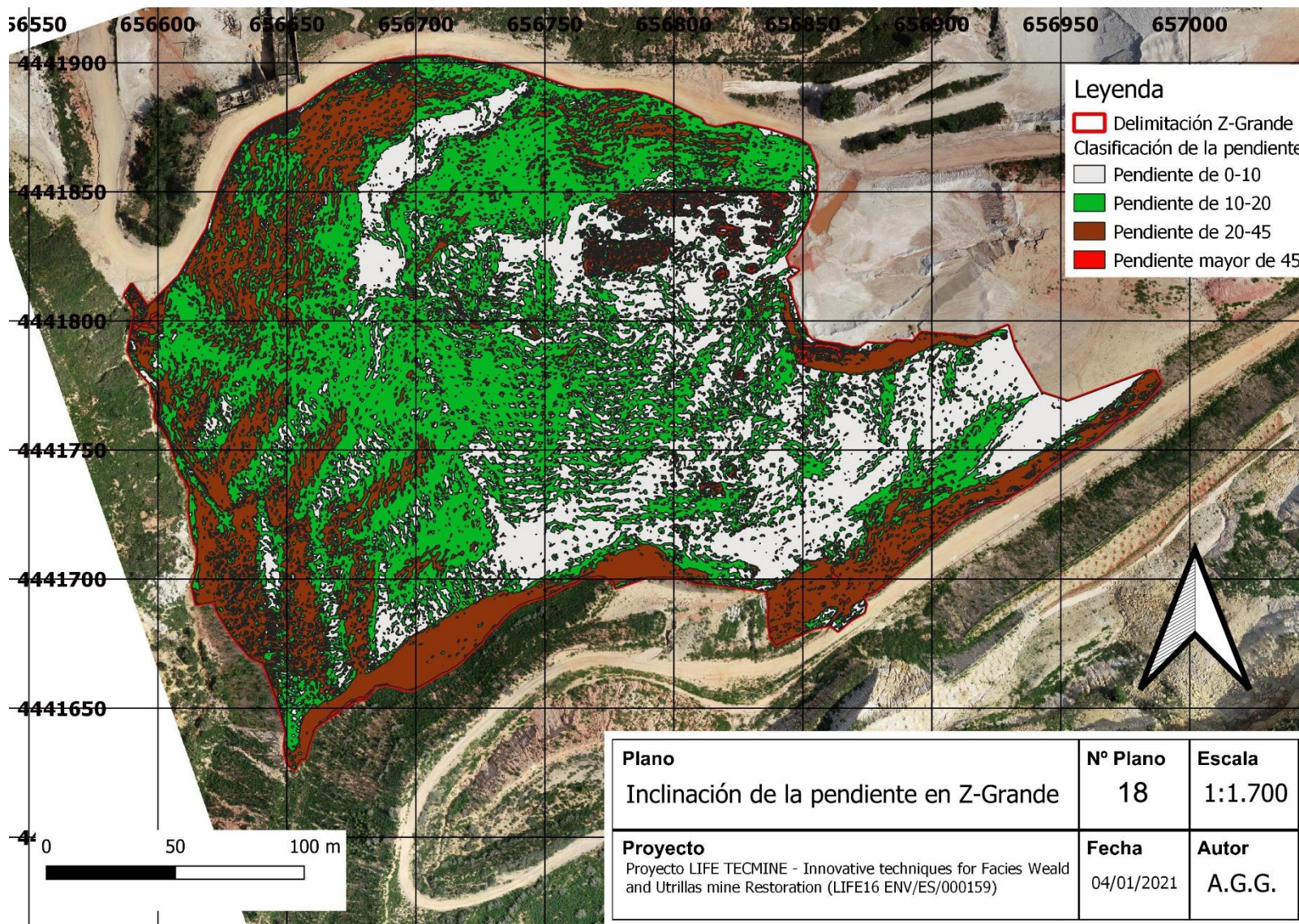


Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 18. Plano de situación de la inclinación de la pendiente en Z-Grande





Universidad  
Complutense  
Madrid



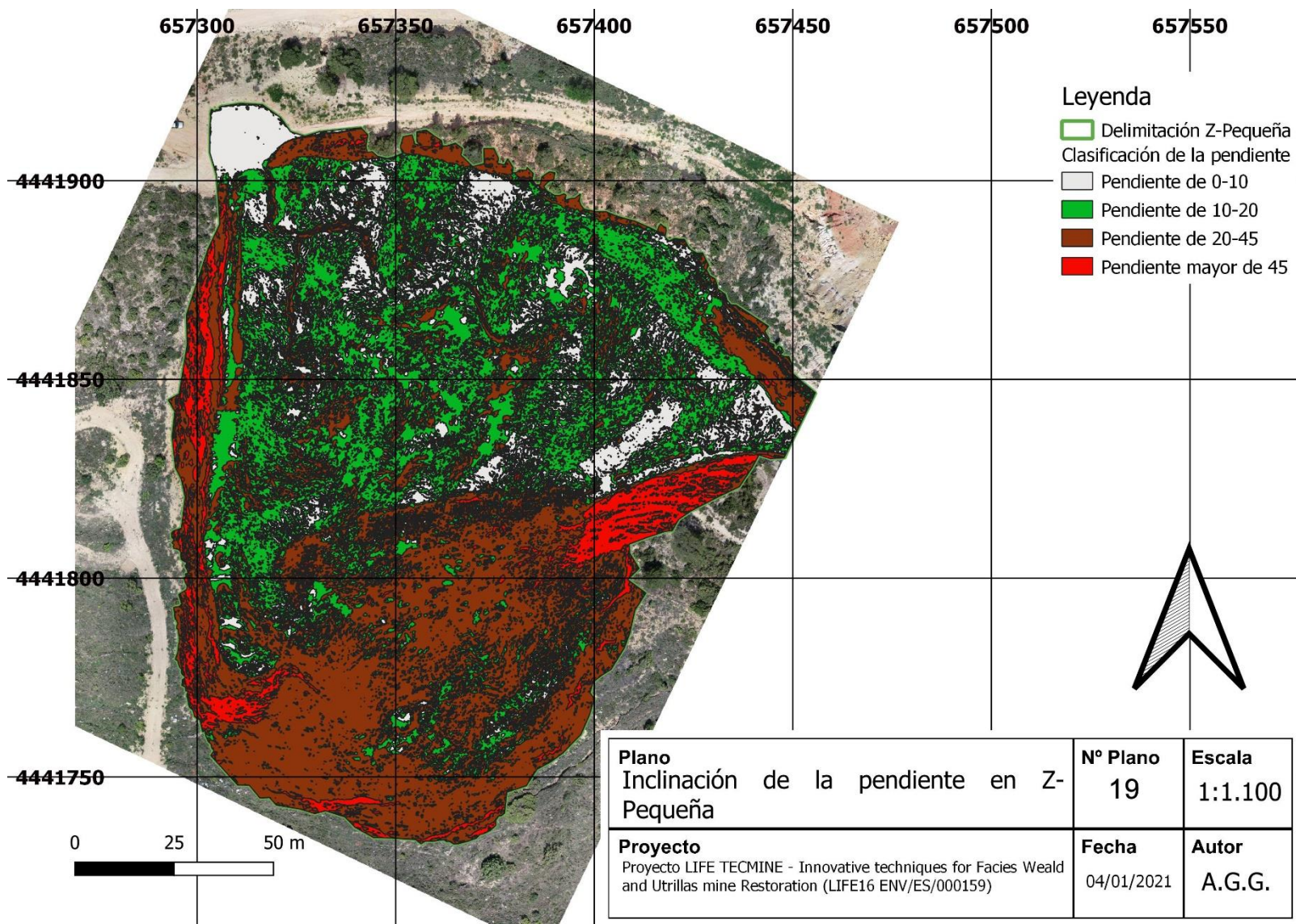
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Anexo 19. Plano de situación de la inclinación de la pendiente en Z-Pequeña







Universidad  
Complutense  
Madrid



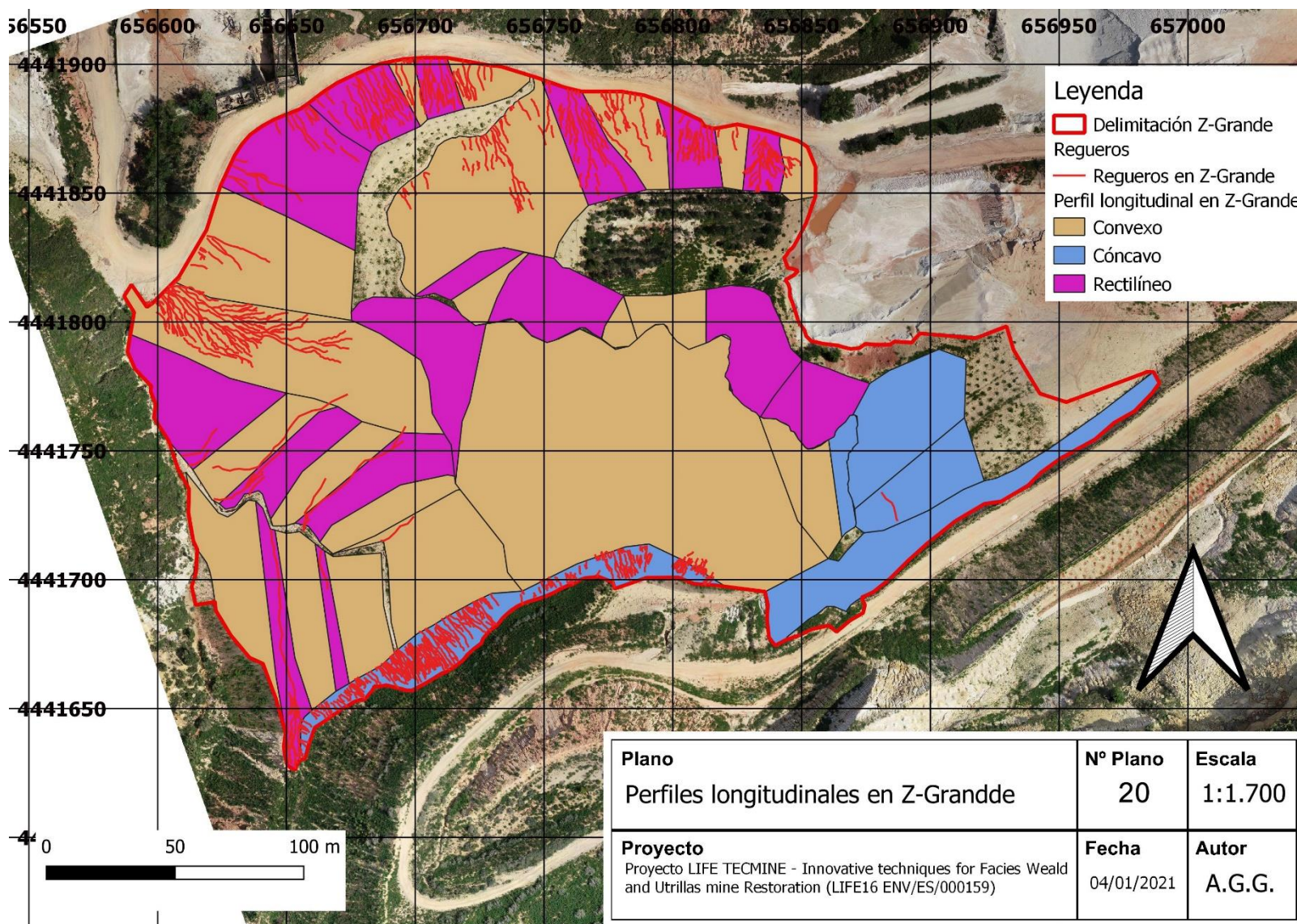
Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 20. Plano de situación de los perfiles longitudinales en Z-Grande









Universidad  
Complutense  
Madrid



Universidad  
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

## Anexo 21. Plano de situación de los perfiles longitudinales en Z-Pequeña

